8|10 JUILLET 2025 | UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE TROYES
Livret des articles et résumés

Table des matières

Page_de_garde_resumes_1.pdf **1**

Caractérisation des effets de la rotation de postes sur la motivation et l'engagement des opérateurs à l'ère de l'industrie 5.0, Vadeboncoeur Dominic [et al.] **1**

Peut-on concilier le LEAN et les Technologies Immersives à l'heure de l'Industrie 5.0 ?, Joblot Laurent [et al.] **10**

Readiness et maturité numérique : Une confusion qui nuit à la transformation numérique des PME manufacturières ?, Gamache Sébastien [et al.] **18**

Renforcement de l'engagement dans l'Industrie 5.0, Goujon Alexandre [et al.] **26**

Ordonnancement et planification multi-ressources, Sow Dahibou Fall **33**

A Smart Logistics Architecture Using IoT and Hashgraph, Ihrouchen Zineb [et al.] **34**

Les éléments déclencheurs de la co-transformation organisationnelle et digitale suivant une approche PLM et PPR, AmergÉ Cyril [et al.] **40**

Stratégie de maintenance industrielle d'une ligne de production intégrant un jumeau numérique, Viaron Kimberley [et al.] **48**

Un modèle innovant de supply chain alliant Blockchain et théorie des jeux, Hrouga Mustapha [et al.] **56**

Un Jumeau Numérique pour la Résilience d'un Système de Systèmes : Cas d'Application à une Ville Intelligente, Smati Meriem [et al.] 62

L'Intelligence Artificielle pour l'Evaluation et l'Optimisation de l'Empreinte Carbone des Services Numériques., Zahout Boukhalfa [et al.] 69

Intégration verticale ERP/MES : OntoIMR pour les gammes de fabrication, Jodeau Claire [et al.] 77

Comment l'IA peut-elle aider au pilotage de projets de développement de logiciels embarqués ?, Naddam Reda [et al.] 84

Innover dans le 5S pour l'amélioration de la performance industrielle : retour sur l'expérience de trois PME, Servoz Laurie [et al.] 86

Staffing for service systems with blended workforce, Yang Kaiyue [et al.] 94

Advanced Artificial Intelligence Methods for Automated Defect Detection and Analysis in 3D-Printed Parts, Samine Sara [et al.] 101

Approche hybride en contrôle qualité : Intégration des cartes de contrôle et du machine learning au profit du secteur manufacturier, Ben Brahem Asma [et al.] 103

Les Facteurs Clés de Succès et les Barrières à la mise en œuvre de la Total Quality Management, Zouagha Houda [et al.] 111

Diagnostic vibratoire des Roulements basé sur le Fast Kurtogram et la Transformée en Ondelettes Continues, Sadji Fares [et al.] 118

Détection d'anomalies dans les signaux de capteurs : application aux systèmes aéronautiques, Bejaoui Mayssa [et al.] 125

Correction des Données de Maintenance par les LLMs : Impact sur l'Évaluation Statistique de la Fiabilité des Systèmes, Payette Mathieu [et al.] 133

Planification des opérations de Maintenance et de Renouvellement des Rails dans les Réseaux Ferroviaires Urbains, Saiem Malak [et al.] 140

Au-delà des composants, l'obsolescence des produits dans les systèmes de défense et du spatial : causes et défis., Demba Harouna [et al.] 142

An explainable deep learning model for predictive maintenance, Pourkarim Guilani Pardis [et al.] 150

Combined Maintenance Routing Problem: a literature review and solution method, Wu Bin [et al.] 158

Quantum circuit for exponentiation of Hamiltonians, Fleury Gérard [et al.] 159

Exact Algorithms for coupling maintenance- production scheduling in a bilevel approach, Schau Quentin [et al.] 165

Quantum Annealing T o S olve NP Hard C ut P roblems, Abbassi Ali [et al.] 166

Order Acceptance Scheduling considering Energy Aspects, Boukerrouis Imane [et al.] 173

A Simulation-Based Approach to Analyzing Railway Capacity: Ethiopia's Railway Line, Jaoui Nadia [et al.] 174

Outil d'aide à la décision pour la stabilisation rapide du processus d'ultrafiltration dans la fabrication du fromage à la crème, Parrenin Loic [et al.] 182

Planification des Approvisionnements et Sélection des Producteurs Agricoles en Horizon Glissant, Germanos Manuella [et al.] 189

Dual Sourcing and Inventory Control Enhanced by Machine Learning-Driven Demand Forecasting, Ben Mabrouk Amel [et al.] 195

Short-term forecast of inbound order volumes in an industrial logistics warehouse: a comparison of traditional techniques and machine learning, Esmaeiliqeshlaqi Maryam [et al.] 201

CAN LLM-BASED AI ASSISTANTS AUTOMATE SYSTEMATIC LITERATURE REVIEWS? CASE STUDY ON LLM APPLICATION IN INDUSTRY, Yazdanpourmoghadam Samira [et al.] 209

Data Challenges in Computer Vision based Digital Twin for Manufacturing Systems, Farhat Nessrine [et al.] 217

Prediction of the Remaining Useful Life of Rolling Bearings: A Machine Learning-Based Approach, Abdelhak Elidrissi [et al.] 225

Un Cadre pour la Sélection de la Solution NLP Optimale pour des Tâches de Classification de Texte dans l'Industrie 4.0, Bourdin Mathieu [et al.] 226

Optimisation adaptative des processus multiproduits : une approche basée sur l'XAI, Belmouadden Mustapha [et al.] 227

Méthode de modélisation de la propagation de maladies infectieuses dans un environnement intérieur, Inghels Clara [et al.] 234

Une métaheuristique pour le problème d'ordonnancement du bloc opératoire sous contraintes de ressources, Chouraqui Marc [et al.] 241

Satisfaction des Professionnels de Santé et Optimisation des Processus : Une Approche Intégrée, Mejri Imen [et al.] 248

Simulating a healthcare system to optimize investment strategies, Baret Isaline [et al.] 254

Set-based modeling formalism for scheduling problems with Hexaly, Blaise Léa 260

An adaptive ILS metaheuristic for the job shop scheduling problem with Time-lags, Aallaoui Soufiane [et al.] 261

Équilibrage des lignes de désassemblage avec collaboration homme-robot : approche hybride d'optimisation bi-objectif, Laouini Oumayma [et al.] 268

Optimisation de la collecte des déchets recyclables dans les pays à faible et moyen revenu, Peña Diana A. [et al.] 269

Modèles de gouvernance de la gestion des matières résiduelles en économie circulaire : Un outil d'aide à la décision pour les administrations publiques

locales, Blouin Florence [et al.] 270

Metaheuristic approach to design and address multi-echelon seafood closed-loop supply chain network, Chokri Hamza [et al.] 278

Traçabilité et performance dans l'affacturage : le rôle des graphes P-temporels et de la blockchain, Guezzi Abdelhak [et al.] 286

Barriers to the adoption of Circular Supply Chains in the context of Moroccan companies: A multi-case study, Assemlali Salwa [et al.] 287

Approche d'estimation spatiale de résidus pour l'approvisionnement d'un réseau logistique circulaire : cas d'étude en viabilité hivernale, Ferjani Nassif 295

Chantiers Intelligents Résilients : Une Analyse Basée sur la Simulation des Perturbations du Flux de Matériaux, Attajer Ali [et al.] 302

Optimizing Spare Parts Management: A Segmentation Approach for Intermittent Demand in Public Transportation Systems, Berbere Rihem [et al.] 303

Gestion d'outillage améliorée par l'utilisation du jumeau numérique : évaluation par simulation de deux niveaux de maturité, Samuel Chloe [et al.] 310

A Two-Stage Robust Approach to Mitigating Supply Chain Disruptions with Pre-Positioned Inventory, Godichaud Matthieu [et al.] 318

Energy-Efficient Distribution Inventory Optimization in the Cold Supply Chain, Godichaud Matthieu [et al.] 319

Wood Supply Management for Pulp and Paper Mills: A Literature Review, Homayouni Zahra [et al.] 321

Flexibility in Transportation to Enhance Wood Delivery Precision, Jahani Niloofar [et al.] 329

Impact de la digitalisation sur l'amélioration la performance du processus de stockage dans le secteur automobile au MAROC, Mimouni Fayçal [et al.] 337

Set-based models for Vehicle Routing Problems and their automatic decomposition in Hexaly, Darlay Julien **338**

Improving Operational Route Planning Through Shared Multi-Configuration Truck Fleets, Shahidi Asudeh [et al.] **339**

Gestion durable des entrepôts grâce aux jumeaux numériques, Drissi Elbouzidi Adnane [et al.] **346**

Social Key Performance Indicator into Sustainable Supply Chains: a review, Monica-Juliana Perez [et al.] **354**

Enhancing Public Transport with Demand-Responsive Services: A Metaheuristic Approach, Penz Louise [et al.] **361**

Solution methods for the VRP with sharing of deliveries between producers in local food logistic, Callico Adrien [et al.] **362**

Logic-based Benders decomposition for fresh food delivery, Montalbano Pierre [et al.] **363**

Wildfire Patrol Routing for Early Detection: Dynamic Periodic Arc Routing Problem with Refill Points, Variable Intervention Times and Relaxed Priority Rule, Nakache Lise [et al.] **364**

Knowledge-based approach for the soft time-consistentcapacitated vehicle routing problem, Bousquet Mathieu [et al.] **365**

Branch-and-Price approach to solve the technician routing and scheduling problem, Yahiaoui Ala-Eddine **368**

Literature review of PLM and AI in industry 5.0: preliminary contribution to proactive design for sustainability, Tu Yimiao [et al.] **370**

The Future of Project Management: For Sustainable Performance in a Complex Environment, Gidel Thierry [et al.] **378**

Adapter la variété des modules pour maîtriser la complexité face à l'individualisation

de masse : un cadre décisionnel, Roy Marc-Antoine [et al.] 386

Gestion intelligente des déchets dans le contexte de l'industrie 4.0, Bahria Nadia [et al.] 394

Optimizing Textile Recycling for a Circular Economy: An Integrated Logistics Approach, Aghelinejad Mohammadmohsen [et al.] 401

Risques éthiques dans le management de la performance dans l'Industrie 4.0 : débat et réflexion, Berrah Lamia [et al.] 403

Insights on Security-by-Design of Cyber-Physical Production Systems: A Systematic Mapping, Elmarkez Ahmed [et al.] 411

Transformative resilience of production systems: some examples, Goepp Virginie [et al.] 419

Simulation-Based Optimization Tool for Additive Manufacturing Systems Managed with DDMRP, Ben Khalifa Mariem [et al.] 424

Stochastic multistage green investment of capital-constrained manufacturing system considering green subsidies and the cap-and-trade market, Nefzi Meriam [et al.] 431

Vers un réseau de recyclage du plastique à faible émission de carbone : Une étude de cas au Québec, Larbi Rim [et al.] 439

Planification des activités de production en serre dans une optique d'efficacité opérationnelle et énergétique : Revue de littérature, Nguemaleu Tchangoue Éliane Audrey [et al.] 448

Une politique dynamique de point de couverture environnemental pour les systèmes hybrides de fabrication et de refabrication sous contraintes d'émissions des GES, Aarab Hassan [et al.] 456

Vers une collecte intelligente des déchets : modèle analytique piloté par les données IoT, Rokh Mohamed Arbi [et al.] 464

Cadre d'analyse et revue de littérature sur le potentiel de réduction d'impact environnemental des méthodes d'efficience industrielle dans l'industrie de la mode et du luxe, Citroën Côme [et al.] **473**

Liste des auteurs **480**

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Caractérisation des effets de la rotation de postes sur la motivation et l'engagement des opérateurs à l'ère de l'industrie 5.0

DOMINIC VADEBONCOEUR[1,2], ROBERT PELLERIN[1], CHRISTOPHE DANJOU[1], FLORIAN MAGNANI[3] ET LAURENT JOBLOT[4]

[1] POLYTECHNIQUE MONTRÉAL - CENTRE INTERUNIVERSITAIRE DE RECHERCHE SUR LES RÉSEAUX D'ENTREPRISE, LA LOGISTIQUE ET LE TRANSPORT (CIRRELT)
2500 chemin de Polytechnique, Montréal (Québec) H3T 1J4, Canada
dominic.vadeboncoeur@polymtl.ca

[2] UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES (UQTR), DÉPARTEMENT DE GÉNIE INDUSTRIEL
3351 boul. des Forges, Trois-Rivières (Québec) G8Z 4M3, Canada

[3] UNIVERSITÉ JEAN MOULIN LYON 3, IAE LYON SCHOOL OF MANAGEMENT
UR Magellan, Lyon, France

[4] ARTS ET MÉTIERS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, LISPEN / HESAM UNIVERSITY
UBFC, Chalon-sur-Saône, France

***Résumé* – La rotation de postes est une pratique répandue au sein des entreprises manufacturières. Ces politiques sont mises en œuvre dans le but de réduire les risques ergonomiques, de développer et de maintenir des compétences ou encore de réduire l'ennui en maintenant de la motivation chez les opérateurs. Alors que les bienfaits sur la réduction des risques ergonomiques sont bien documentés dans la littérature, il en est tout autre en matière d'impact sur la motivation et l'engagement des opérateurs. Ce papier a pour objectif de caractériser les politiques de rotation de postes recensées dans la littérature selon une grille créée à cet effet. Cela a ensuite permis d'analyser les impacts rapportés sur la motivation et l'engagement des opérateurs. Les résultats indiquent que l'engagement a été étudié uniquement sous l'angle de la satisfaction au travail, une mesure jugée incomplète par plusieurs chercheurs. Des besoins psychologiques associés à la motivation, tels que le besoin de compétence et d'appartenance, n'ont pas encore été explorés. De plus, aucune étude ne vise à identifier l'adaptation des politiques de rotation de postes au type de motivation des opérateurs. Il semblerait toutefois qu'augmenter l'autonomie des opérateurs soit une solution permettant de renforcer l'engagement.**

***Abstract* – Job rotation is a common practice in manufacturing companies. These policies aim to achieve various objectives, such as reducing ergonomic risks, developing, and maintaining multiple skills, and stimulating operators' motivation by alleviating the boredom of repetitive tasks. While the benefits of reducing ergonomic risks are well-documented in the literature, the impact of these policies on psychosocial factors, such as motivation and engagement, remains understudied. This paper aims to characterize job rotation policies identified in the literature using a framework specifically developed for this purpose. This framework was then used to analyze the reported impacts on operator motivation and engagement. The results indicate that engagement has been studied solely from the perspective of job satisfaction, which is considered an incomplete measure by multiple researchers. No study has sought to identify how to adapt job rotation policies for specific types of operator motivation. Concerning rotation policies, increasing operator autonomy seems to be a solution to enhance engagement. However, other psychological needs, such as the need for competence and belonging, also require further investigation.**

***Mots clés* – Rotation de postes, motivation, engagement, satisfaction au travail, Industrie 5.0.**
***Keywords* – Job rotation, motivation, engagement, job satisfaction, Industry 5.0.**

1 INTRODUCTION

La rotation de postes désigne une politique de gestion qui organise la répartition du travail journalier (8h) de façon à ce qu'un opérateur ait la possibilité d'être affecté à différentes tâches ou stations de travail durant celui-ci (Prunet *et al*., 2024). Ces pratiques ont fait leur apparition dans le domaine manufacturier durant les années 1980 (Battini *et al.*, 2022; Padula *et al.*, 2017).

La mise en place de ces politiques poursuit un ou plusieurs objectifs à la fois. Certains auteurs rappellent que l'utilisation de la rotation de postes permet de réduire les risques de blessures chez les opérateurs, notamment les lésions ou troubles musculosquelettiques (TMS) (Botti *et al.*, 2021; Digiesi *et al.*, 2018; Otto *et* Scholl, 2013). Comme le rapportent Prunet *et al.* (2024), la stratégie générale derrière ces modèles est de s'assurer que plusieurs opérateurs se partagent la charge physique ou cognitive d'une tâche jugée plus risquée sur le plan

ergonomique. Par exemple, Assunção *et al.* (2022) ont développé un algorithme génétique cherchant à minimiser le risque ergonomique de chaque opérateur calculé suivant la méthode *Ergonomics Assembly Worksheet* (EAWS). Ces travaux visent à aider les superviseurs dans leurs décisions concernant les règles d'attribution de la rotation de poste sur une ligne d'assemblage.

On note également le recours à des modèles multi-objectifs qui prennent en compte à la fois le risque ergonomique ainsi que d'autres caractéristiques individuelles chez les opérateurs. Asencio-Cuesta *et al.* (2012) ont développé, par exemple, un modèle ayant pour objectif de limiter le risque ergonomique calculé avec la méthode *Occupational Repetitive Actions Index* (OCRA) tout en tenant compte des limitations physiques de chaque opérateur. Bien que la littérature propose de nombreux modèles de rotation de postes intégrant les risques ergonomiques, Padula *et al.* (2017) soulignent le manque de preuves empiriques quant à l'efficacité de la rotation de postes pour prévenir l'apparition de TMS chez les opérateurs. Un constat similaire avait aussi été formulé par Guimaraes et al. (2012).

D'autres avantages de la rotation de postes sont également mis de l'avant, notamment son rôle dans le développement des compétences chez les opérateurs (Azizi, Zolfaghari et Liang, 2010), dans la réduction de l'ennui et donc de l'augmentation de la motivation (Bhadury *et* Radovilsky, 2006). L'implantation de politiques de rotation de postes au sein des entreprises américaines telles qu'American Cyanamid, Bethlehem Steel, Ford et TRW concluaient que ces politiques n'avait pas réussi à augmenter la motivation ni la satisfaction des opérateurs (Griffin, 1993). D'autres auteurs rapportent toutefois que la rotation de poste avait bel et bien contribué à une augmentation de la satisfaction des opérateurs, sans toutefois, améliorer leur performance (Bhadury et Radovilsky, 2006).

Ce manque de consensus sur l'impact de la rotation de postes sur les opérateurs soulève de nombreuses questions. En effet, à l'ère de l'industrie 5.0 où le bien-être des opérateurs est mis à l'avant-plan, il est indispensable de mieux comprendre comment les politiques de rotation de postes affectent la motivation et l'engagement des opérateurs dans le milieu manufacturier (Battini *et al.*, 2022). Ces facteurs contribuent grandement au maintien d'une bonne santé mentale des opérateurs (Deci *et* Ryan, 2008a; Macey *et* Schneider, 2008). C'est pourquoi cet article propose une nouvelle grille d'analyse permettant d'identifier les stratégies de rotation de personnel présentes dans la littérature et d'en analyser leur impact sur la motivation et l'engagement des opérateurs.

La suite de l'article est structurée de la façon suivante. La section 2 présente la méthodologie employée pour identifier les articles issus de la littérature scientifique. La section 3 présente ensuite les principaux résultats rapportés ainsi qu'une revue critique des méthodologies de recherche employées. La section 4 poursuit avec une discussion des constats qui émanent de cette analyse avant de conclure par l'élaboration de certaines pistes et stratégies à employer pour mieux étudier l'impact de la rotation de poste et de ses caractéristiques sur la motivation et l'engagement des opérateurs à la section 5.

2 METHODOLOGIE

À partir des mots clés *job rotation* et *manufacturing*, une recherche d'articles a été effectuée dans les bases de données *Scopus* et *Web of Science* jusqu'au 8 novembre 2024. Un nombre importants de journaux, notamment des sciences naturelles et du génie sont indexés dans ces deux bases de données (Asubiaro, Onaolapo et Mills, 2024). Cela a permis d'identifier quatre revues de littérature abordant la rotation de postes dans le domaine manufacturier sur un total de 266 articles (Battini *et al.*, 2022; Katiraee, Battini, Battaia et Calzavara, 2020; Padula *et al.*, 2017; Prunet *et al.*, 2024). Le choix de se limiter aux revues de littérature répond à l'objectif de ce papier : classifier les recherches existantes sur la rotation de postes à l'aide d'une nouvelle grille d'analyse.

Les quatre revues de littérature étudiées, recensent 14 articles qui, à la lecture des résumés, semblent avoir étudié des facteurs psychosociaux reliés de près ou de loin à la motivation et l'engagement. Ces 14 articles identifiés ont été lus en totalité afin d'éliminer ceux ne rapportant pas de résultat sur l'engagement ou la motivation par le recours à une ou plusieurs politiques de rotation de postes. Quatre articles ont finalement été retenus (Battini *et al.*, 2022; Dawal, Taha et Ismail, 2009; Filus *et* Okimorto, 2012; Guimaraes *et al.*, 2012). Il est important de mentionner que le terme *job reassignment* a retourné, en très grande majorité, des articles du domaine des ressources humaines où les chercheurs étudient le changement de fonction des salariés au sein d'une organisation. Pour cette raison, le terme réassignation de poste ne sera pas utilisé pour la suite du présent article pour éviter toute confusion.

3 RESULTATS

Cette section présente d'abord une caractérisation des politiques de rotation de postes que l'on retrouve dans les quatre articles conservés. Cette analyse est menée avec l'aide de la grille proposée (tableau 1). Ensuite, les concepts de la motivation et de l'engagement seront introduits et les résultats spécifiques en lien avec ces facteurs humains seront présentés. Finalement, une analyse critique des méthodologies employées par les auteurs est conduite en recourant aux grilles d'évaluation du *Joanna Briggs Institute* (JBI) (Barker *et al.*, 2024; Moola *et al.*, 2017).

3.1 Principaux résultats de recherche

Le tableau 1 présente un résumé des politiques de rotation de postes utilisés dans les articles analysés. La nature des tâches étudiées dans ces travaux est cohérente avec des tâches manufacturières répétitives se prêtant bien à la rotation de poste. Si certains auteurs restent vagues quant à la description des tâches (Dawal *et al.*, 2009; Guimaraes *et al.*, 2012; Jeon *et* Jeong, 2016), les autres mentionnent des tâches d'assemblage manuel ainsi que des tâches d'inspection nécessitant plus d'attention de la part des opérateurs (Battini *et al.*, 2022).

La fréquence de rotation de poste varie entre 60 et 232 minutes, soit l'équivalent de 1 à 7 rotations de postes pour un travail journalier de 8 heures. Une exception apparait dans les travaux de Jeon et Jeong (2016) où certaines unités de production étudiées pouvaient avoir une fréquence de rotation de postes allant jusqu'à 1 mois en raison de la durée et la complexité de certaines tâches. Cet article a tout de même été conservé, car certaines unités de production étudiées pratiquaient la rotation de poste selon la définition donnée en introduction, soit au moins une fois par jour.

Une caractéristique importante des politiques de rotation de poste est le niveau d'implication des opérateurs sur la décision de rotation. Battini *et al.* (2022) présentent un modèle mathématique dans lequel l'opérateur n'est pas impliqué du tout dans la décision. L'idée derrière ces travaux est de développer un outil d'aide à la décision pour que les superviseurs puissent assigner les opérateurs à la prochaine tâche à réaliser en tenant compte d'un certain nombre de variables. Par opposition, Guimaraes *et al.* (2012) ont mis en place une ligne pilote où de petites équipes de 6 à 8 employés qui sont chargés de décider du moment et de l'attribution des tâches entre les opérateurs. On

observait alors en moyenne une rotation de postes toutes les 90 minutes.

Dans la même veine, Jeon et Jeong (2016) mentionnent laisser la pleine autonomie aux opérateurs de décider de la politique de rotation de postes, mais donnent très peu de détails sur l'opérationnalisation de ces politiques. Pour leur part, Dawal *et al.* (2009) n'ont pas donné de détails sur les politiques de rotation de postes mises en place dans les entreprises faisant l'objet de leur étude longitudinale. Ils rapportent tout de même que la pratique de rotation de postes était un bon prédicteur du niveau de satisfaction au travail des opérateurs.

En somme, cette analyse permet de faire quelques constats importants. Premièrement, les fréquences de rotation de postes utilisées dans les politiques étudiées sont très variables (allant de 1 à 7 fois par journée de travail) et sont soit prédéterminées par les gestionnaires ou dictées par les opérateurs. Cette fréquence semble, *a priori*, être influencée par les temps de cycle des opérations manufacturières. Par exemple, un temps de cycle plus court amène une fréquence de rotation plus élevée selon Jeon et Jeong (2016). Du point de vue de l'opérationnalisation des politiques de rotation autonomes, très peu de détails sont mentionnés par les auteurs.

De son côté, le tableau 2 rapporte les informations sur les participants des études et des réponses mesurées en lien avec la motivation ou le bien-être des opérateurs. Il est important de souligner que la plupart des réponses mesurées sont subjectives,

Tableau 1. Résumé des politiques de rotation de postes rapportées par les chercheurs

Article (auteurs, année)	Nature des tâches	Temps de cycle (s)	Politique de rotation			
			Fréquence de rotation	Facteurs humains	Objectif(s)	Implication des opérateurs
Battini et al. (2022)	Assemblage, contrôle qualité et emballage (Pompe à eau)	Entre 10 et 28 minutes	Prédéterminée (allant de 86 à 232 minutes)	-Niveau d'ennui perçu -Age -Expérience	-Maximiser la productivité -Minimiser l'ennui perçu -Minimiser le risque ergonomique (REBA)	Indirecte (prise en compte du niveau d'ennui perçu pour chaque tâche)
Dawal et al. (2009)	Tâches diverses (Secteur automobile)	NR*	NR	NR	NR	NR
Guimaraes et al. (2012)	Ligne d'assemblage avec différentes tâches (fabrication de chaussures)	NR	- Au choix des opérateurs. (moyenne de 1,5h observée)	Apprentissage	-Augmenter l'autonomie des opérateurs	Groupe de 6 à 8 opérateurs qui décident du moment de la rotation appuyé par un leader.
Jeon et Jeong (2016)	Tâches diverses (secteur automobile)	Variable (très court à très long)	Autonomie complète (allant de 1 heure à 1 mois)	NR	-Augmenter la productivité -Réduire les accidents (SST) -Augmenter la satisfaction des opérateurs	NR

* NR : Non rapporté par les auteurs.

Tableau 2. Caractéristiques expérimentales

Référence (auteurs, année)	Participants				Durée des observations	Réponse(s) mesuré(s)	Méthodologie employée**		
	Nombre	Âge	Genre	Niveau d'expérience			C	Q-E	T
Battini et al. (2022)	0 (simulé)	N/A	N/A	N/A	N/A	Ennui perçu		X	
Dawal et al. (2009)	170	26,8 ans en moyenne	Hommes seulement	6,8 ans en moyenne	Questionnaire (observation unique)	Satisfaction au travail			X
Guimaraes et al. (2012)	100	NR	NR	Capable de s'acquitter de plus de 150 tâches	3,5 ans	Absentéisme		X	
Jeon et Jeong (2016)	422	40 ans en moyenne	NR	17,3 années	5 ans	Satisfaction au travail (Likert)	X		

** C : Cohorte, Q-E : Quasi-expérimentale, T : Transversale

soit le niveau d'ennui perçu et la satisfaction au travail (Battini *et al.*, 2022; Dawal *et al.*, 2009; Jeon et Jeong, 2016). Pour ce qui est des travaux de Guimaraes *et al.* (2012), ils ont eu recours à des mesures d'absentéisme et de taux de roulement des opérateurs. Ces dernières peuvent, selon les auteurs, indiquer la satisfaction des opérateurs et leur motivation au travail. Les réponses mesurées dans le tableau 2 indiquent des mesures se rapportant à l'engagement ou la motivation des opérateurs. En ce qui a trait aux participants impliqués dans ces études, on remarque que le nombre de participants varie entre 0 et 422 témoignant d'une forte dispersion au niveau méthodologique.

Seulement deux études communiquent des informations spécifiques à l'égard des participants permettant de mieux caractériser la population étudiée. Dawal *et al.* (2009) rapportent une population d'opérateurs appartenant à deux entreprises différentes, ayant en moyenne 26,8 ans et une expérience de travail moyenne de 6,8 années. Du côté de Jeon et Jeong (2016), on rapporte une population appartenant à la même entreprise mais étant beaucoup plus expérimentée et âgée. Ces auteurs rapportent une moyenne de 40 ans et une expérience moyenne de 17,3 années parmi les 422 participants à l'étude. On doit souligner que selon les chercheurs un opérateur peu expérimenté peut avoir jusqu'à 15 ans d'expérience ce qui ne représente peut-être pas la réalité des entreprises à l'intérieur desquelles on retrouve un taux de roulement élevé des opérateurs. Peu de travaux rapportent le genre des opérateurs mis à part les travaux de Dawal *et al.* (2009) qui rapportent avoir étudié une population exempte de femme. Finalement, pour ce qui est des méthodologies employées par les chercheurs, on dénombre deux études quasi-expérimentales[1], une étude transversale[2] et une étude de type cohorte[3].

3.2 Impacts rapportés sur la motivation

Avant de présenter les résultats des effets de la rotation de postes sur la motivation et l'engagement des opérateurs, il convient de définir clairement dans son entièreté les facteurs humains. Dans le domaine de la psychologie, la théorie de l'auto-détermination (TAD) de Ryan et Deci (2000) est l'une des plus reconnues et repose sur d'importantes bases empiriques (Deci *et* Ryan, 2008b). Selon ces auteurs, la motivation comprend plusieurs types, (intrinsèque, extrinsèque et l'amotivation) qui se positionnent sur un continuum de l'autodétermination relative (voir Figure 1). De manière générale, les chercheurs ont démontré que plus la motivation est intrinsèque à l'individu (et autodéterminée), plus ce dernier démontrera de la persistance et de l'adhésion envers sa tâche et risque de présenter un rendement plus efficace (Deci et Ryan, 2008a). À l'inverse, un individu présentant une absence de motivation (amotivation) ou ayant une régulation externe aura tendance à être peu engagé, être aux prises avec des problèmes de santé mentale ou subir un épuisement professionnel (Paquet *et* Vallerand, 2016).

Dans un contexte manufacturier où les tâches sont hautement répétitives et se prêtent à la rotation de postes, il est difficile d'atteindre un état de motivation fortement autodéterminé. Pour éprouver ce type de motivation, il faudrait que les tâches à réaliser soient en elles-mêmes source d'intérêt et de plaisir pour l'opérateur. Cette définition de la motivation autodéterminée devrait être prise en compte lors de l'attribution des tâches en contexte de rotation de poste. Par exemple, pour accroître la motivation autodéterminée des opérateurs selon le modèle de Battini *et al.* (2022), il conviendrait de prendre en compte l'importance relative qu'ils accordent à chaque tâche à accomplir, plutôt que de rechercher à minimiser la similarité perçue entre les tâches qui leur sont attribuées. Cet objectif serait davantage cohérent avec la définition même de la motivation autodéterminée (Deci et Ryan, 2008a). Parmi les articles étudiés, la motivation des opérateurs dans un contexte de rotation de postes risque d'être davantage extrinsèque étant donné la nature répétitive et monotone des tâches à exécuter. Cette hypothèse avait aussi été utilisée par Passalacqua *et al.*

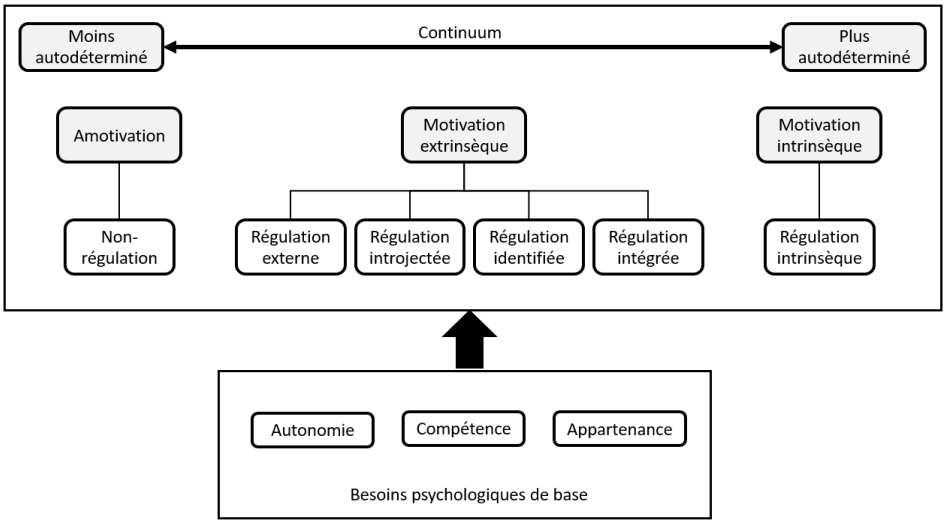


Figure 1. Continuum de l'autodétermination, types de motivation et besoins de bases en psychologie (adaptée de Passalacqua *et al*., 2024 et Deci *et* Ryan, 2008a)

[1] Étude présentant une ou plusieurs limitations telles une absence ou pseudo-randomisation des participants, l'absence d'un groupe témoin, des variables non contrôlées ou un contrôle limité sur les variables (Barker *et al.* 2024).

[2] Étude donnant le portait de certaines variables dans une population définie à un instant donné. Sert à décrire un phénomène (Aromataris et Munn (2020).

[3] Étude longitudinale basée sur la présence ou l'absence d'un phénomène ou d'une caractéristique. Les participants font l'objet d'un suivi tout au long de l'étude (Aromataris et Munn (2020).

(2024) qui avait étudié la motivation chez des opérateurs en formation avec un outil d'intelligence artificielle et qui effectuait également des tâches répétitives.

La TAD propose trois types de régulation soit (i) introjectée, (ii) identifiée et (iii) intégrée (Figure 1). Comme mentionné plus tôt, une régulation externe ne suppose aucune intériorisation de l'individu et il est enclin à réaliser une tâche pour obtenir une récompense ou éviter une conséquence (Deci et Ryan, 2008a; Paquet et Vallerand, 2016). Du côté de la motivation (i) introjectée, l'individu peut ressentir une grande fierté en cas de réussite, mais peut facilement ressentir de la honte ou se déprécier en cas d'échec (Paquet et Vallerand, 2016). Ces types de régulation sont à éviter et risquent de mener l'individu à un état d'amotivation à long terme surtout s'il vit des échecs en lien avec la tâche à réaliser (Deci et Ryan, 2008a).

Ensuite, on recense la régulation (ii) identifiée qui pousse l'individu à s'identifier à la *valeur* du comportement, et de ce fait, à accepter de plein gré de modifier son comportement (Deci et Ryan, 2008a; Paquet et Vallerand, 2016). À ce niveau de régulation, certains bienfaits peuvent être ressentis chez l'individu comme un plus grand sentiment d'autonomie face aux contraintes de la tâche (Deci et Ryan, 2008a).

Finalement, le dernier niveau de régulation est la régulation (iii) intégrée. À ce stade, le niveau d'identification s'intensifie par le fait que la tâche à réaliser est en adéquation avec les valeurs et la nature profonde de l'individu (Deci et Ryan, 2008a). Ce niveau de régulation constitue « le meilleur moyen pour que les comportements motivés par des facteurs extrinsèques deviennent vraiment autonomes et autodéterminés ». On remarque que plus l'on progresse dans le continuum de l'autodétermination, plus la motivation est dite de qualité, car elle se colle de plus en plus aux aspirations et aux valeurs de l'individu (Deci et Ryan, 2008a, 2008b; Paquet et Vallerand, 2016).

Sur la base de ces éléments, on remarque qu'aucun article n'a étudié le type de motivation, ce qui est pourtant un facteur important dans un contexte de rotation de postes. Selon Deci et Ryan (2008a), le type de motivation est généralement plus important que son intensité dans la prédiction des résultats de réussite ou de rendement des individus. On peut donc affirmer que plus de recherches sont nécessaires pour tenter de comprendre le type de motivation que peuvent ressentir les opérateurs lorsqu'ils sont exposés à diverses politiques de rotation de poste.

Également, au cœur de cette théorie résident les trois besoins fondamentaux de base pour les individus, soit les besoins de compétence, d'autonomie et d'appartenance. Le besoin de compétence fait référence au *désir* d'un individu d'avoir un impact sur son environnement et d'atteindre des résultats souhaités (Brien *et al.*, 2012; Ryan et Deci, 2000). Le besoin d'autonomie se définit comme le *désir* d'un individu de faire ses propres choix, d'exprimer librement ses sentiments et d'initier ses propres actions (Brien *et al.*, 2012; Ryan et Deci, 2000). Finalement, le besoin d'appartenance fait référence au *désir* d'établir des liens mutuellement bienveillants et des alliances positives avec les autres.

Bien que d'autres besoins soient influencés par la culture et les croyances de l'individu (par exemple, le besoin de reconnaissance ou l'accumulation de biens), des études ont démontré que les trois besoins de bases revêtent un caractère universel chez les individus (Deci et Ryan, 2008a). De plus, le degré avec lequel ces besoins de bases sont supportés ou manquants pour l'individu a une influence sur le type de motivation ressenti (Deci et Ryan, 2008b). Il est donc important que le contexte manufacturier dans lequel évolue les opérateurs puisse permettre de satisfaire ces besoins psychologiques.

Au niveau des besoins psychologiques, Guimaraes *et al.* (2012) stipulent que leur objectif de recherche était de donner davantage d'autonomie aux opérateurs avec l'implémentation d'une ligne pilote d'assemblage de chaussures. Finalement, ce sont 100 opérateurs qui ont été formés à travailler dans leur unité de production. Sur le plan opérationnel, les opérateurs étaient regroupés en équipes de 6 à 8 personnes disposant d'une autonomie complète pour organiser la rotation de postes selon leurs préférences. Les auteurs rapportent qu'en moyenne le changement de postes s'effectuait toutes les 90 minutes. Certains témoignages d'opérateurs relatent le fait que la nouvelle méthode renforce le sentiment d'engagement des opérateurs dans l'ensemble du processus et que ceux-ci ne se préoccupent pas seulement de leur travail, mais aussi de leurs collègues qui amène à l'augmentation de la qualité du processus. À la fin de la période d'analyse, soit 3 années et demie, la plupart des opérateurs pouvait exécuter jusqu'à 150 tâches différentes sur la ligne de production.

À la lumière de ses résultats, il semble qu'une politique de rotation de postes où les opérateurs sont eux-mêmes appelés à décider de la rotation à effectuer et de la fréquence permet à ces derniers de combler une partie de leurs besoins psychologiques. Cependant, la plupart de ces observations sont basées uniquement sur des témoignages venant des opérateurs (appartenance et compétences). Des expérimentations utilisant des questionnaires reconnus en psychologie devront être utilisés afin de valider ces hypothèses.

Il est d'autant plus important d'avoir recours à des questionnaires reconnus puisqu'il est démontré que le bien-être psychologique des individus est plus élevé lorsque les trois besoins fondamentaux sont comblés de façon équilibrée (Paquet et Vallerand, 2016; Sheldon *et* Niemiec, 2006).

Finalement, du côté de Jeon et Jeong (2016), les auteurs ont opté pour une politique où la décision sur le prochain poste à occuper était aussi prise de façon autonome par les opérateurs. En revanche, selon la nature des tâches, la fréquence de rotation de poste a été fixée par l'entreprise et pouvait aller d'un changement à chaque heure à moins d'un changement par mois. Très peu de détails ont été donnés par les auteurs qui permettraient d'évaluer si les besoins de compétence et d'appartenance sont bien comblés chez ces participants.

3.3 Impacts rapportés sur l'engagement

À l'instar de la motivation, il convient de bien définir l'engagement des opérateurs. Selon Macey et Schneider (2008), les termes motivation au travail et engagement sont souvent utilisés comme synonymes, causant une certaine confusion dans la littérature. L'engagement est également souvent relié à la productivité des opérateurs, ce qui ne reflète pas la notion de l'engagement définie en psychologie. Ce cadre psychologique se décline en trois axes distincts soit les traits, l'état et le comportement lié à l'engagement (Macey et Schneider, 2008). Les traits sont vu comme la prédisposition d'un individu à exprimer de l'engagement au travail. On dit que certaines personnes sont plus enclines à exprimer de l'engagement, car leur personnalité et leur positivisme les prédisposent à cette condition. Passalacqua *et al.* (2024) ont, par exemple, utilisé les résultats d'un questionnaire visant à quantifier les traits d'engagement des opérateurs comme variable de covariance au cours de la formation d'opérateurs assistés d'un outil d'intelligence artificielle.

La notion d'état d'engagement, qui représente la facette la plus facilement mesurable, est également très présente dans la littérature. Il est ainsi possible de trouver des mesures qui y font référence comme la satisfaction, l'autonomisation (empowerment) et l'initiative (Macey et Schneider, 2008). Selon ces auteurs, les travaux récents ont étudié davantage l'absorption, la passion et l'affect des individus envers leur travail pour quantifier l'engagement des opérateurs plutôt que simplement la satisfaction ou l'implication (Erickson, 2005; Macey et Schneider, 2008). Selon Erickson (2005), l'engagement va plus loin que simplement la satisfaction ou la loyauté envers l'employeur ou son travail.

Finalement, un individu engagé pourra exprimer un certain nombre de comportements observables tels que se montrer persévérant ou arriver tôt au travail (Macey et Schneider, 2008). Les caractéristiques propres aux tâches à réaliser comme la variété, le défi et l'autonomie peuvent aussi influencer l'engagement. Cela suggère directement que la mise en place d'une politique de rotation de postes visant une variété plus grande de tâches tel qu'on le retrouve dans le modèle de Battini *et al.* (2022) pourrait avoir un impact positif sur l'engagement des opérateurs. Du côté de l'autonomie perçue par l'opérateur, cette caractéristique peut s'apparenter au besoin d'autonomie qui est un besoin psychologique de base que l'on retrouve au cœur de la TAD. Il est alors possible de croire que de procurer une plus grande autonomie aux opérateurs est bénéfique autant d'un point de vue d'engagement que de motivation.

Qui plus est, il est possible d'avancer que l'étude de Guimaraes *et al.* (2012), qui ont utilisé des mesures d'absentéisme et de taux de roulement dans leurs travaux, recense davantage des critères d'engagement chez les opérateurs que de motivation. On pourrait cependant exprimer certaines réserves sur ces résultats puisque ces derniers peuvent être influencés par des facteurs externes et non simplement par la politique de rotation de postes effective. Les opérateurs attitrés à cette nouvelle unité de production ont été choisis sur la base du volontariat, ce qui peut introduire un biais étant donné que des opérateurs volontaires ont à la base des traits d'engagement plus favorables. Ce faisant, lorsque comparé avec le reste des opérateurs, il serait normal de mesurer un plus grand niveau d'engagement chez ces derniers.

Il est également important de souligner les résultats en lien avec la satisfaction au travail qui sont présentés par deux articles (Dawal *et al.*, 2009; Jeon et Jeong, 2016). Les premiers auteurs rapportent que la rotation de postes était parmi les cinq plus grands facteurs qui prédisent la satisfaction des opérateurs. Cependant, aucun détail n'a été donné sur les politiques mises en place dans l'une ou l'autre des entreprises étudiées. Du côté de Jeon *et* Jeong (2016), ils avancent que les opérateurs moins expérimentés préfèrent se voir attribués des tâches plus simples et plus répétitives en comparaison aux opérateurs plus expérimentés qui préfèrent les tâches plus longues et moins répétitives. Cela suggère que des opérateurs avec moins d'expérience seraient plus enclins à démontrer de l'engagement dans une politique de rotation de postes où la fréquence de rotation est plus élevée.

Ces résultats suggèrent que l'engagement des opérateurs dans un contexte de rotation de postes doit être étudié davantage et que des protocoles expérimentaux plus rigoureux et mieux documentés devront être utilisés pour comprendre le rôle joué par certaines caractéristiques des politiques de rotation de postes sur ce facteur humain.

3.4 Évaluation méthodologique selon les critères du JBI

Dans le cadre de cette étude, une évaluation de la qualité méthodologique des articles recensés a été effectuée à l'aide des grilles d'évaluation du Joanna Briggs Institute (JBI). Cette démarche vise à évaluer si les résultats rapportés reposent sur des études fiables et méthodologiquement robustes. Le tableau 3 présente les résultats de cette évaluation. La note finale accordée aux articles est en fonction du nombre de critères identifiés dans les méthodologies des chercheurs. Si la proportion de critères est en deçà de 33% l'évaluation est faible, si la proportion est entre 33 et 66% elle est qualifiée de passable, et finalement, elle est bonne si la proportion est à 66% ou plus.

Tableau 3. Évaluation méthodologique selon les critères du *Joanna Briggs Institute* (JBI)

	Critères d'évaluation pour les études de cohortes selon Moola et al. (2020)[a]												
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**Total**	**Qualité méthodologique**
Jeon et Jeong (2016)	+	+	+	+	-	NR	+	+	+	NR	+	8/11	Bonne
	Critères d'évaluation pour études transversales selon Moola et al. (2020)[b]												
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**				**Total**	**Qualité méthodologique**
Dawal et al. (2009)	+	+	-	+	-	-	-	+				4/8	Passable
	Critères d'évaluation des études quasi-expérimentales selon Barker et al. (2024)[c]												
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**			**Total**	**Qualité méthodologique**
Battini et al. (2022)	+	-	NA	NA	-	NA	-	NA	+			2/9	Faible
Guimaraes et al. (2012)	+	-	-	NR	-	+	+	+	+			5/9	Passable

+ : Oui, - : Non, NR : Non rapporté, NA : Non applicable.

[a] Critère : Population (1), Exposition (2 et 3), Confusion (4 et 5), Résultat indépendant (6), Mesure (7), Suivi (8, 9 et 10), Outils statistiques (11).

[b] Critère : Critère d'inclusion (1), Contexte (2), Exposition (3), Objectifs (4), Confusion (5 et 6), Mesure (7), Outils statistiques (8).

[c] Critère : Relation de cause à effet (1), Groupe de contrôle (2), Participants (3 et 4), Résultats (5, 6 et 7), Suivi (8), Outils statistiques (9).

Ces barèmes sont les mêmes que ceux utilisés par Padula *et al.* (2017).

Deux chercheurs ont procédé à l'évaluation méthodologique de ces papiers (DV et RP) et, en cas d'égalité, un troisième chercheur (CD) était appelé à trancher pour l'évaluation du critère. Un seul article a reçu la cote « bonne » au niveau de l'évaluation méthodologique. Il s'agit de l'étude de cohortes de Jeon et Jeong (2016). On se doit de souligner la durée de l'observation qui s'élève à 5 ans avec un grand nombre de participants, soit 422. Au niveau des résultats, les statistiques de production proviennent des logiciels intégrés de l'entreprise tandis que la satisfaction au travail a été mesurée de façon subjective avec un questionnaire à l'aide d'une échelle de Likert.

Deux études ont été qualifiées de « passable » au point de vue de la qualité méthodologique. Il s'agit des travaux de Dawal *et al.* (2009) et Guimaraes *et al.* (2012). Le premier article présente une étude transversale visant à identifier les facteurs pouvant prédire la satisfaction au travail. Des opérateurs de deux différentes entreprises ont ainsi répondu à un questionnaire. Une analyse de régression montre que la variété des compétences, le bruit ambiant, la rotation de postes et les méthodes de travail sont les facteurs les plus significatifs pour prédire la satisfaction avec un R^2= 0,898 pour l'entreprise A et R^2= 0,848 pour l'entreprise B. Cependant, aucun détail n'est donné sur la manière dont s'effectue la rotation de postes ni sur la conception des tâches à effectuer dans les deux entreprises, ce qui rend très difficile l'interprétation des résultats.

Du côté de Guimaraes et al. (2012), une étude quasi-expérimentale est présentée se déroulant dans une entreprise de chaussures. Si dans ce cas-ci la politique de rotation de postes est bien décrite par les auteurs, ceux-ci donnent très peu d'information sur les participants et ne présentent pas de groupe de contrôle. Une autre distinction de cette étude est que les mesures employées sont factuelles (absentéisme et taux de roulement du personnel) contrairement aux autres études qui ont eu recours à des mesures subjectives auto-rapportées, dont la satisfaction au travail.

Finalement, les travaux de Battini et al. (2022) ont obtenu une qualité méthodologique « faible » en grande partie pour avoir eu recours à la simulation et non pas à une expérimentation impliquant de vrais participants. Néanmoins, il est intéressant de souligner l'approche de modélisation de l'ennui des opérateurs dans leur modèle. Les chercheurs ont demandé à des opérateurs de noter chacune des tâches à réaliser et fonction de leur degré de ressemblance. Le modèle mathématique tentait alors d'effectuer une rotation de poste en minimisant l'ennui des opérateurs en fonction de la similarité perçue entre les tâches. Ces auteurs semblent directement combattre l'ennui chez les opérateurs en proposant des tâches qui sont perçues comme étant très différentes par ces derniers.

4 Discussion

Ces travaux ont permis de mettre en évidence un certain manque de connaissances concernant l'impact de la rotation de postes sur la motivation et l'engagement des opérateurs. Aucun article n'a rapporté de résultats permettant de qualifier le type de motivation qu'éprouvent les opérateurs lorsqu'exposés à de la rotation de postes. Ce constat est surprenant puisque dans les revues de littérature analysées, les chercheurs rapportent à plusieurs reprises que la motivation est un facteur largement étudié. Cela renforce l'argument de Macey et Schneider (2008) à savoir que la motivation au travail et l'engagement sont souvent des termes interchangés, mais pourtant très distincts du point de vue psychologique.

Un autre aspect important est le rôle joué par les besoins psychologiques fondamentaux (autonomie, compétence et appartenance) sur l'engagement. À cet effet, Guimaraes *et al.* (2012) démontrent bien une satisfaction au travail plus grande lorsque les opérateurs disposent d'une plus grande autonomie dans la politique de rotation de postes (choix de la tâche et de la fréquence). Ce résultat va à l'encontre des multiples modèles mathématiques d'aide à la décision des superviseurs que l'on retrouve dans la littérature cherchant à attitrer des opérateurs à des tâches spécifiques à des fréquences prédéterminées. Pour ce qui est des besoins de compétences et d'appartenance, plus de recherches seront nécessaires pour bien comprendre comment combler ces besoins avec des politiques de rotation de postes. Comme piste de recherche potentielle, les témoignages de certains opérateurs qui éprouvaient une certaine appartenance envers leur petite équipe de travail suggèrent qu'une politique de rotation de poste doit toucher un nombre restreint d'opérateurs.

Au niveau de l'engagement, certains résultats doivent être mentionnées, même s'ils doivent être relativisés selon leur contexte. Aucun protocole n'utilise de questionnaire reconnu pour mesurer l'engagement et les chercheurs présentent que des résultats se rapportant à la satisfaction au travail. Des mesures plus adaptés d'engagement sont reconnues telles que l'absorption, la passion et l'affect (Erickson, 2005; Macey et Schneider, 2008). Aucun auteur n'a pris en compte le niveau d'engagement naturel (trait d'engagement) des participants qui a pourtant été identifié comme une mesure de covariance par Passalacqua *et al.* (2024).

Également, l'analyse de la qualité méthodologique selon le JBI fait ressortir le fait que les futures recherches doivent avoir recours à des méthodologies cherchant à identifier clairement les facteurs de confusion et établir des protocoles visant à minimiser le plus possible l'effet de ces facteurs dans les résultats publiés. L'utilisation de groupes de contrôle clairement définis doit aussi faire partie des méthodologies utilisées par les auteurs qui souhaitent étudier l'impact de la rotation de postes sur ces facteurs humains.

En résumé, cette analyse fait ressortir d'intéressantes perspectives de recherche. D'abord, le manque de connaissances sur la mise en opération de ces politiques ouvre la porte à une analyse multi-cas ou à une étude par sondage visant un nombre important d'entreprises. Par ailleurs, cette étude pourrait être bonifiée par un entretien des opérateurs touchés par ces politiques afin de mesurer plus précisément les effets de ces dernières sur la motivation et l'engagement. Ces nouvelles connaissances pourraient ensuite servir de base à des expérimentations en laboratoire où ces différentes politiques seraient testées et comparées à un groupe de contrôle.

5 Conclusion

En conclusion, ces travaux ont permis le développement d'une nouvelle classification permettant l'étude des politiques de rotation de postes en milieu manufacturier sur la motivation et l'engagement des opérateurs. Un certain nombre de constats ont découlé de ce travail de recherche. Premièrement, une étude plus fine de certaines caractéristiques de la rotation de postes (fréquence de rotation, nature des tâches à effectuer, rétroaction donnée à l'employé) sous forme d'expérimentation scientifique, pourrait permettre de mieux guider les praticiens dans la mise en place de politiques ayant comme objectif le bien-être des opérateurs. Les résultats rapportés en termes d'engagement sont majoritairement des mesures de satisfaction du travail qui est une mesure jugée incomplète pour étudier l'engagement au travail (Erickson, 2005; Macey et Schneider, 2008). Finalement,

les résultats ont mis en évidence le manque de connaissances quant à la capacité des politiques de rotation de postes à générer de la motivation chez les opérateurs.

Pour aider les chercheurs à mieux mesurer les facteurs humains inhérents à l'industrie 5.0, ces derniers devront avoir recours à des questionnaires psychologiques éprouvés permettant une compréhension plus large des effets ressentis par les opérateurs (Paquet et Vallerand, 2016). L'industrie 5.0 et les technologies qui s'y rattachent offrent un potentiel intéressant pour bonifier ces expérimentations avec de nouvelles mesures physiologiques captées en temps réel permettant de mieux étudier des facteurs humains de nature psychosociale tels que l'engagement et la motivation (Loizaga, Eyam et Bastida, 2023). Ces technologies pourraient également permettre d'identifier en temps réel les opérateurs éprouvant de l'ennui ce qui pourrait mener à la personnalisation des politiques de rotation de postes en fonction de l'état psychologique révélé en temps réel chez les opérateurs.

6 BIBLIOGRAPHIE

Aromataris, E. et Munn, Z. (2020). *JBI Manual for Evidence Synthesis JBI, 2020 [Available from: https://synthesismanual. jbi. global. https://doi. org/10.46658.* du site de JBIMES-20-01:.

Asensio-Cuesta, S., Diego-Mas, J. A., Canós-Darós, L. et Andrés-Romano, C. (2012). A genetic algorithm for the design of job rotation schedules considering ergonomic and competence criteria. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *60*(9-12), 1161–1174. doi:10.1007/s00170-011-3672-0

Assunção, A., Mollaei, N., Rodrigues, J., Fujão, C., Osório, D., Veloso, A. P.,. . . Carnide, F. (2022). A genetic algorithm approach to design job rotation schedules ensuring homogeneity and diversity of exposure in the automotive industry. *Heliyon*, *8*(5). doi:10.1016/j.heliyon.2022.e09396

Asubiaro, T., Onaolapo, S. et Mills, D. (2024). Regional disparities in Web of Science and Scopus journal coverage. *Scientometrics*, *129*(3), 1469–1491.

Azizi, N., Zolfaghari, S. et Liang, M. (2010). Modeling job rotation in manufacturing systems: The study of employee's boredom and skill variations. *International Journal of Production Economics*, *123*(1), 69–85. doi:10.1016/j.ijpe.2009.07.010

Barker, T. H., Habibi, N., Aromataris, E., Stone, J. C., Leonardi-Bee, J., Sears, K.,. . . Moola, S. (2024). The revised JBI critical appraisal tool for the assessment of risk of bias for quasi-experimental studies. *JBI Evidence Synthesis*, *22*(3), 378–388.

Battini, D., Berti, N., Finco, S., Zennaro, I. et Das, A. (2022). Towards industry 5.0: A multi-objective job rotation model for an inclusive workforce. *International Journal of Production Economics*, *250.* doi:10.1016/j.ijpe.2022.108619

Bhadury, J. et Radovilsky, Z. (2006). Job rotation using the multi-period assignment model. *International Journal of Production Research*, *44*(20), 4431–4444.

Botti, L., Calzavara, M. et Mora, C. (2021). Modelling job rotation in manufacturing systems with aged workers. *International Journal of Production Research*, *59*(8), 2522–2536. doi:10.1080/00207543.2020.1735659

Brien, M., Forest, J., Mageau, G. A., Boudrias, J.-S., Desrumaux, P., Brunet, L. et Morin, E. M. (2012). The basic psychological needs at work scale: Measurement invariance between Canada and France. *Applied Psychology: Health and Well-Being*, *4*(2), 167–187.

Dawal, S. Z., Taha, Z. et Ismail, Z. (2009). Effect of job organization on job satisfaction among shop floor employees in automotive industries in Malaysia. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *39*(1), 1–6.

Deci, E. L. et Ryan, R. M. (2008a). Favoriser la motivation optimale et la santé mentale dans les divers milieux de vie. *Canadian psychology/Psychologie canadienne*, *49*(1), 24.

Deci, E. L. et Ryan, R. M. (2008b). Self-determination theory: A macrotheory of human motivation, development, and health. *Canadian psychology/Psychologie canadienne*, *49*(3), 182.

Digiesi, S., Facchini, F., Mossa, G. et Mummolo, G. (2018). Minimizing and balancing ergonomic risk of workers of an assembly line by job rotation: A MINLP Model. *International Journal of Industrial Engineering and Management*, *9*(3), 129–138. doi:10.24867/IJIEM-2018-3-129

Erickson, T. J. (2005). Testimony Submitted before the US Senate Committee on Health. *Education, Labor and Pensions, May*, *26*.

Filus, R. et Okimorto, M. L. (2012). The effect of job rotation intervals on muscle fatigue–lactic acid. *WORK-A JOURNAL OF PREVENTION ASSESSMENT & REHABILITATION*, *41*(Supplement 1), 1572–1581.

Griffin, R. W. (1993). Management, 4th. *Edition, Houghtan Mifflin Company, Boston*.

Guimaraes, L. B., Anzanello, M. J. et Renner, J. S. (2012). A learning curve-based method to implement multifunctional work teams in the Brazilian footwear sector. *Applied Ergonomics*, *43*(3), 541–547. doi:10.1016/j.apergo.2011.08.008

Jeon, I. S. et Jeong, B. Y. (2016). Effect of Job Rotation Types on Productivity, Accident Rate, and Satisfaction in the Automotive Assembly Line Workers. *Human Factors and Ergonomics In Manufacturing*, *26*(4), 455–462. doi:10.1002/hfm.20667

Katiraee, N., Battini, D., Battaia, O. et Calzavara, M. (2020). Human diversity factors in production system modelling and design: state of the art and future researches. Dans (p. 2544–2549). doi:10.1016/j.ifacol.2019.11.589

Loizaga, E., Eyam, A. T. et Bastida, L. (2023). A comprehensive study of human factors, sensory principles, and commercial solutions for future human-centered working operations in industry 5.0. *IEEE Access*, *11*, 53806–53829.

Macey, W. H. et Schneider, B. (2008). The meaning of employee engagement. *Industrial and organizational Psychology*, *1*(1), 3–30.

Moola, S., Munn, Z., Tufanaru, C., Aromataris, E., Sears, K., Sfetcu, R.,. . . Lisy, K. (2017). Systematic reviews of etiology and risk. Dans *Joanna Briggs Institute reviewer's manual* (p. 217–269). The Joanna Briggs Institute Adelaide, Australia.

Otto, A. et Scholl, A. (2013). Reducing ergonomic risks by job rotation scheduling. *OR Spectrum*, *35*(3), 711–733. doi:10.1007/s00291-012-0291-6

Padula, R. S., Comper, M., Sparer, E. H. et Dennerlein, J. T. (2017). Job rotation designed to prevent musculoskeletal disorders and control risk in manufacturing industries: A systematic review. *Applied Ergonomics*, *58*, 386–397. doi:10.1016/j.apergo.2016.07.018

Paquet, Y. et Vallerand, R. (2016). *La théorie de l'autodétermination: Aspects théoriques et appliquées*: De Boeck Supérieur.

Passalacqua, M., Pellerin, R., Yahia, E., Magnani, F., Rosin, F., Joblot, L. et Léger, P.-M. (2024). Practice with less AI makes perfect: partially automated AI during training leads to better worker motivation, engagement, and skill acquisition. *International Journal of Human–Computer Interaction*, 1–21.

Prunet, T., Absi, N., Borodin, V. et Cattaruzza, D. (2024). Optimization of human-aware logistics and manufacturing systems: A survey on the Human-Aware Models. *EURO JOURNAL ON TRANSPORTATION AND LOGISTICS*, *13.* doi:10.1016/j.ejtl.2024.100137

Ryan, R. M. et Deci, E. L. (2000). Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being. *American psychologist*, *55*(1), 68.

Sheldon, K. M. et Niemiec, C. P. (2006). It's not just the amount that counts: balanced need satisfaction also affects well-being. *Journal of personality and social psychology*, *91*(2), 331.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Peut-on concilier le LEAN et les Technologies Immersives à l'heure de l'Industrie 5.0 ?

Joblot Laurent[1], Magnani Florian[2], Rosin Frédéric[1], Robert Pellerin[3], Mario Passalacqua[4]

[1] Arts et Métiers Institute of Technology, LISPEN / HESAM University / UBFC, Chalon-Sur-Saône, France (e-mail: laurent.joblot@ensam.eu ; frederic.rosin@ensam.eu)

[2] Université Jean Moulin Lyon 3, iaelyon school of management, UR Magellan, Lyon, France (e-mail: (florian.magnani@univ-lyon3.fr)

[3] Département de Mathématiques et de Génie Industriel, Polytechnique Montréal, Montréal, QC, H3T 1J4, Canada (e-mail: robert.pellerin@polymtl.ca)

[4] Department of Psychology, Université du Québec à Montréal, 100 Sherbrooke St W, Montreal, QC, H2X 3P2 (passalacqua.mario@uqam.ca)

***Résumé* – L'Industrie 5.0, promue par la Commission Européenne, marque une évolution de l'Industrie 4.0 en mettant l'accent sur l'intégration des technologies avec l'humain. Toutefois, la majorité des études scientifiques se concentrent encore sur les aspects techniques, négligeant les impacts humains et sociaux. Le LEAN, qui valorise l'amélioration continue et le respect des employés, pourrait jouer un rôle clé dans l'adoption de pratiques 4.0, dont l'intégration de technologies immersives de type Jumeaux Numériques ou Réalité Virtuelle. Le programme français JENII vise d'ailleurs à développer des environnements d'apprentissage immersifs pour former les futurs professionnels, l'un d'entre eux s'intéressant justement au LEAN. Cependant, la revue de littérature proposée ici révèle que l'impact réel de ces technologies sur les opérateurs reste peu documenté et leur compatibilité avec les fondamentaux du LEAN demeure incertaine. Cette recherche met donc en évidence un manque de données empiriques et appelle à davantage d'expérimentations en environnements réels ou en usines-écoles. De telles études permettront de combler ces manques en explorant les impacts physiques, psychologiques ou cognitifs des technologies immersives sur les opérateurs. Ces avancées offrent des opportunités pour enrichir les approches pédagogiques, soutenir le déploiement en entreprise des technologies 5.0, tout en assurant la cohérence avec les principes du LEAN.**

***Abstract* – Industry 5.0 (I5.0), promoted by the European Commission, represents an evolution of Industry 4.0 (I4.0) by emphasizing technology integration with humans. However, most scientific studies to date focus primarily on technical aspects, neglecting human and social impacts. LEAN, which values continuous improvement and respect for employees, could play a key role in adopting immersive technologies such as Digital Twins (DT) and Virtual Reality (VR). In France, the JENII program aims to develop immersive learning environments to train future professionals, one of which focuses specifically on LEAN. However, the literature review presented here reveals that the real impact of these technologies on operators remains poorly documented, and their compatibility with LEAN fundamentals remains uncertain. This research, therefore, highlights a lack of empirical data and calls for more experiments in real-world environments, particularly through learning factories. Future studies could fill significant gaps by exploring the physical, psychological, and cognitive impacts of immersive technologies on operators. These advancements offer opportunities to enrich educational approaches and support the deployment of I5.0 technologies in companies in line with LEAN principles.**

***Mots clés* - LEAN, Industrie 5.0 (I5.0), Réalité Virtuelle (RV), Etudes centrées sur l'humain, Jumeau Numérique (JN).**
***Keywords* – LEAN, Industry 5.0, Virtual Reality, Human-centered studies, Digital Twin.**

1 INTRODUCTION

Le concept d'Industrie 5.0 (I5.0), actuellement mis en avant par la Commission Européenne, est présenté comme une évolution de l'Industrie 4.0 (I4.0), mettant l'accent sur une **intégration harmonieuse entre la technologie et l'humain dans les processus industriels** [Direction générale de la recherche et de l'innovation (Commission européenne) et al. 2023]. L'intégration technologique envisagée repose sur trois fondements. Elle doit être **soutenable, socialement acceptable et résiliente**. Cependant, de récentes publications soulignent un manque d'études approfondies et de données probantes sur la dimension de l'acceptabilité sociale et sur les effets réels de ces technologies sur les individus [Goujon et al. 2024] [Yahia et al. 2024], les chercheurs préférant se

concentrer sur les dimensions techniques. Ce constat se retrouve également chez les industriels même s'il existe quelques exceptions. Comme à son habitude, dans son dernier rapport Sustainability Data Book[1] l'entreprise Toyota rappelle que son *monozukuri* (manufacturing) dépends du développement de ses ressources humaines. La place du LEAN face au déploiement de technologies 4.0 était déjà au centre d'assez récentes études [Rosin et al. 2019]. À présent que l'I5.0 met davantage l'accent sur les individus, le LEAN comme un système dynamique structurant et stimulant les activités des employés à travers l'amélioration continue et le respect des individus [SUGIMORI et al. 1977] devrait être largement plébiscitée, ou tout au moins étudié, par les communautés scientifiques et industrielles.

L'objectif de cette recherche part donc de cette réflexion et vise à synthétiser les études qui traitent de l'impact des principales technologies 4.0 sur les organisations, les performances des processus, mais surtout sur les opérations/opérationnels dans un contexte LEAN. Parmi les dix groupes technologiques de l'I4.0 généralement définis [Beaudoin et al. 2016], après l'IA et la robotique, **les Jumeaux Numérique (JN) et les outils d'immersion** sont les technologies les plus étudiées, déployées ou envisagées ces dernières années par le secteur manufacturier ou le domaine de l'enseignement. Convaincue du potentiel de ces technologies, et dans le but de former la prochaine génération d'ingénieurs et de techniciens, la France, via l'Agence Nationale de la Recherche, investit d'ailleurs massivement dans le programme Jumeaux d'Enseignement Numériques, Immersifs et Interactifs (JENII[2]). Ce projet vise à créer 14 JN pour développer des environnements d'apprentissage interactifs et immersifs, notamment à l'aide de solutions de réalité virtuelle (RV). L'un d'eux, intitulé « Projets LEAN Manufacturing et Système industriel automatisé - Apprentissage expérientiel – Usine Flexible de Production » traite en particulier la question de l'enseignement le LEAN à travers un JN [Cedric and Fernagu 2023]. Cependant, ce projet permettra-t-il de révéler l'impact d'un jumeau numérique sur les opérateurs et les environnements LEAN ? Dans un rapport conjoint d'industriels et d'universitaires intitulé « Jumeau Numérique. Levier majeur de la transformation digitale »[3] , de nombreuses perspectives prometteuses pour les industriels en termes de gains attendus grâce aux JN sont mises en évidence. Toutefois, moins de 25 % (5/23) des cas d'usage imaginés dans ce même rapport concernent ou impliquent directement les opérateurs dans un contexte de production. Ces technologies contribueront-elles alors réellement aux objectifs de l'I5.0 ? Quels seront leurs impacts sur les facteurs humains (FH) ? Ces technologies vont-elles, par conséquent, se substituer ou compléter les démarches LEAN en entreprise ?

Pour tenter de répondre à toutes ces interrogations, voici donc les questions de recherches formulées pour ce travail exploratoire :

- **À l'ère de l'I5.0, quelles sont les preuves empiriques permettant de justifier l'utilisation des technologies immersives, telles que la RV ou les JN, dans les organisations LEAN nécessitant à la fois de la robustesse et de la flexibilité ?**
- **Existe-t-il des mesures d'impact de ces technologies sur les FH, notamment les dimensions physiques, psychologiques ou cognitives des opérateurs ?**
- **Enfin, dans quelle mesure les données disponibles sont-elles suffisantes pour évaluer la compatibilité de ces technologies avec les principes du LEAN et leur efficacité pour améliorer les performances organisationnelles ?**

Pour répondre à ces questions, et après avoir défini plus précisément les différents éléments de vocabulaire en Section 2, une revue de la littérature sera présentée en Section 3 afin de caractériser les connaissances existantes et les axes de recherche pertinents. Sur la base de ces données, la Section 4 proposera un cadre de travail et des perspectives pour répondre, sur le long terme, aux interrogations soulevées.

2 CONTEXTUALISATION ET CADRE CONCEPTUEL

Afin de mieux appréhender l'interaction entre les technologies 4.0, les JN et les principes du LEAN dans le contexte de l'I5.0, il est nécessaire de clarifier certains concepts clés et appréhender d'éventuelles liaisons entre ces concepts. Cette section propose une définition précise des notions fondamentales pour établir un cadre d'analyse cohérent.

2.1 Réalité étendue

Selon Meta[4], la RV[5] crée un environnement numérique immersif grâce à la modélisation et la simulation par ordinateur. La réalité augmentée[6] (RA) ajoute des éléments numériques au monde réel pour améliorer la perception de l'environnement. La réalité mixte[7] (RM) combine les mondes virtuel et physique, permettant leur interaction. La réalité étendue (XR) est un terme global qui inclut la RV, la RA et la RM, décrivant toute technologie qui modifie la réalité avec des éléments numériques.

Au-delà du concept de métavers, que les GAFAM tentent de démocratiser auprès du grand public, le nombre de solutions de VR HMD (*head-mounted display*) constructeurs et la diversité de domaines concernés par ces technologies sont en pleine expansion ["Rapport étude de marché CNXR 2023 V.1" 2023]. Les raisons peuvent être nombreuses, par exemple lorsque les environnements industriels sont difficiles d'accès, peu disponibles ou dangereux. Dans de tels cas, la formation sur équipements réels s'avère être compliquée. Compte tenu des coûts ou du temps nécessaires pour construire des prototypes efficaces, les solutions immersives se révèlent alors être des outils appropriés pour optimiser l'espace ainsi que les ressources financières ou humaines. [Faure et al. 2023].

L'étude de l'utilisateur, au cœur du dispositif, fait par ailleurs l'objet de récentes études. Une revue de la littérature portant sur l'utilisation des biosenseurs portables dans les applications de RV immersive a permis l'identification de 560 articles s'approchant de cette question [Guillen-Sanz et al. 2024]. Elle a mis en évidence certaines avancées ainsi que d'importantes

[1] https://global.toyota/pages/global_toyota/sustainability/report/sdb/sdb24_en.pdf

[2] https://anr.fr/ProjetIA-21-DMES-0006

[3] http://www.industrie-dufutur.org/content/uploads/2023/05/AIF_JumeauNumerique_FR-version-Web.pdf

[4] https://forwork.meta.com/fr/blog/difference-between-vr-ar-and-mr/

[5] https://www.youtube.com/watch?v=hdq2gcewPks

[6] https://www.youtube.com/watch?v=en_2q4oztzE

[7] https://www.youtube.com/watch?v=XtTxCqPbCds

faiblesses dans l'étude et la mesure du ressenti en temps réel lors d'expériences immersives. Moins de 20 % des expériences étudiées (98/560 articles) utilisent ou mentionnent le biofeedback, une mesure qui évalue les paramètres physiologiques de l'utilisateur lors de l'exécution d'une tâche. Les principaux domaines prenant en compte ce biofeedback sont la psychologie (20 %), la médecine (16 %) et le sport (18,6 %). La Figure 1 montre que l'évaluation des émotions n'est pas toujours une priorité dans les enquêtes post-tests. À ce titre, les auteurs rapportent également que les données collectées aident principalement à comprendre la relation émotionnelle de l'utilisateur **avec l'application** (par exemple, l'anxiété et la peur), **plutôt qu'avec l'environnement de travail**. Les autres axes explorés (majoritaires avec plus de 68 % des mesures) incluent les fonctionnalités de l'expérience d'utilisation et les spécificités de la RV (mal du simulateur, satisfaction, engagement ou plaisir, perceptions des participants, immersion, présence, confort, latence du système, etc.). Cette préoccupation croissante pour l'analyse des émotions et leur impact sur le bien-être mérite donc d'être explorée plus en profondeur dans de futurs travaux, notamment sur l'impact émotionnel de la solution sur les opérationnels au regard du contexte LEAN environnant.

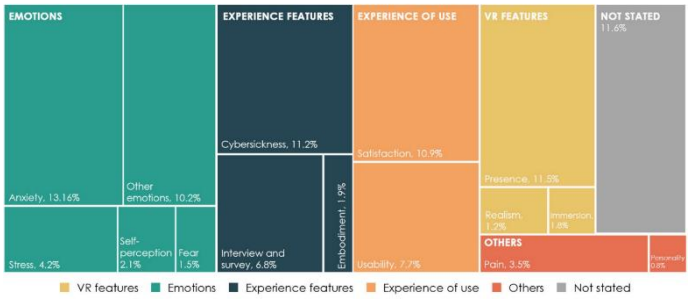


Figure 1 : Centre d'intérêt des questionnaires post-test d'expérimentations en RV selon [Guillen-Sanz et al. 2024]

2.2 Jumeau Numérique

Les JN ou Digital Twins (DT) sont des représentations virtuelles utiles pour la simulation, l'analyse et la manipulation en temps réel de données, d'objets, de systèmes ou de processus physiques [Grieves 2005]. Ces répliques servent à diverses fins, telles que la surveillance, le diagnostic, la prévision et l'optimisation des performances dans différents secteurs. Initialement utilisés dans l'aérospatiale, les DT couvrent désormais des domaines comme la fabrication industrielle, la santé, les villes intelligentes, l'éducation et l'agriculture [Mateev 2020]. Un JN idéal permet un flux bidirectionnel d'informations où les données en temps réel mettent à jour la représentation virtuelle pour les simulations et la prise de décision dans le système physique. Les JN dans l'I4.0 peuvent contribuer à améliorer les chaînes d'approvisionnement au cœur du processus LEAN. Cependant, cette relation et ces effets restent peu étudiés [Guo and Mantravadi 2024].

Peu de domaines échappent ainsi à l'exploitation ou, à tout le moins, à l'évocation des JN. Lorsqu'ils sont combinés à des technologies immersives, ces outils promettent ou offrent un potentiel considérable pour améliorer la formation, la supervision, la détection d'erreurs et la prise de décision, des objectifs qui s'alignent également étroitement avec ceux du LEAN [Mihai et al. 2022].

2.3 Le LEAN

La philosophie LEAN est une culture de travail visant à identifier et réduire les dysfonctionnements avec un investissement financier mesuré et une forte implication des employés, ce qui augmente la valeur ajoutée et améliore les performances globales de l'entreprise. Développée par Toyota après la Seconde Guerre mondiale sous le nom de Toyota Production System (TPS), elle a été popularisée sous le terme de LEAN Production en 1988 par le MIT [Krafcik 1988]. Cette approche qui a inspiré de nombreuses industries, du secteur automobile aux services bancaires et hospitaliers, demeure une référence en organisation du travail**.**

Cette philosophie se matérialise par un système d'exécution et d'apprentissage dynamique qui structure et stimule les activités des employés sur la base de l'amélioration continue et du respect des personnes [SUGIMORI et al. 1977]. Pour y parvenir, le système offre aux employés les moyens nécessaires pour renforcer et protéger l'apprentissage organisationnel [Saabye et al. 2024] en leur donnant les capacités d'explorer leurs propres préjugés afin de satisfaire les attentes des clients.

Le LEAN peut être observé à deux niveaux d'abstractions différents :

- Une stratégie organisationnelle qui se concentre sur l'efficacité des flux (sans diminuer le niveau de qualité) pour obtenir l'efficacité des ressources comme effet secondaire [Modig and Åhlström 2012] ; et
- Une attitude individuelle vis-à-vis du travail clairement définie par l'exécution de tâches, leur amélioration et l'innovation, qui contribueront au développement des compétences en tant qu'effet secondaire [Balle and Balle 2009].

De cette philosophie découle la nécessité pour l'entreprise de se focaliser sur le capital humain et le capital social, qui est bien souvent à l'origine de la valeur ajoutée. Il est alors crucial pour un industriel d'être en mesure de remettre régulièrement en question ses modes de fonctionnement, ses processus et ses standards, tout en maximisant la flexibilité des postes et des personnes. Par essence, le LEAN s'inscrit donc naturellement dans les principes émergents de l'I5.0 [Fani et al. 2024].

Dans la suite de cette étude, il sera essentiel d'analyser si les technologies immersives (JN ou RV) influencent positivement des pratiques telles que l'amélioration continue, le Jidoka, la TPM, le 5S, la prise de décision ou encore la réduction des lead times... Il sera également crucial d'évaluer dans quelle mesure le monde scientifique a étudié ces influences, leur perception par les équipes sur le terrain et leur impact réel sur leurs pratiques.

2.4 Etude des Facteurs humains

L'I5.0 [Direction générale de la recherche et de l'innovation (Commission européenne) et al. 2023], fondée sur les principes de l'I4.0, met donc l'accent sur la fusion des capacités humaines et technologiques pour créer un paradigme industriel durable, résilient et centré sur l'humain. Elle vise à aligner la technologie avec les comportements et **les besoins humains**, tout en intégrant des aspects éthiques et sociétaux dans son développement et son déploiement. Par conséquent, pour bénéficier des opportunités de transformation des environnements industriels qu'offrent les technologies 4.0 (dont la RV et les JN) sans conséquence sur les FH, il nous faut comprendre et bien définir ces derniers. Une étude récente propose d'analyser les effets des technologies selon quatre

dimensions principales : cognitive, psychosociale, comportementale et physique [Passalacqua, Pellerin, Magnani, et al. 2024]. Certaines de ces dimensions, en particulier cognitive et psychosociale, demeurent peu explorées dans la littérature, ce qui limite la compréhension globale des effets de leurs déploiements.

La dimension cognitive porte sur des processus mentaux et perceptifs qui incluent la charge cognitive, la prise de décision et la fatigue. Dans cette optique, plusieurs études montrent que la complexité des technologies immersives peut conduire à une surcharge cognitive lorsque les interfaces ou les tâches sont mal conçues [Neumann et al. 2021] [Passalacqua, Pellerin, Magnani, et al. 2024]. En revanche, lorsqu'elles sont correctement intégrées, ces mêmes technologies peuvent renforcer les compétences des opérateurs en facilitant l'apprentissage et la résolution de problèmes [Longo et al. 2019].

La dimension psychosociale se concentre sur la façon dont les opérateurs perçoivent et vivent leur environnement de travail, englobant **la motivation, l'engagement, l'autonomie et le stress**. Bien que ces facteurs soient essentiels au bien-être et à la performance, de nombreuses études [Neumann et al. 2021]; [Sgarbossa et al. 2020] [Grosse et al. 2023] pointent leur sous-représentation dans la recherche. [Passalacqua, Pellerin, Yahia, et al. 2024] fournissent un exemple pertinent, en montrant que des niveaux d'automatisation équilibrés, où l'opérateur conserve un contrôle significatif, favorisent à la fois la **motivation et l'engagement**. Ces travaux mettent en évidence la nécessité de maintenir un juste équilibre entre assistance technologique et **autonomie humaine** afin d'instaurer un environnement psychosocial de travail plus positif.

La dimension comportementale se focalise sur les indicateurs observables, tels que la performance et **l'acceptation de nouvelles technologies**. Dans ce contexte, la transparence et la fiabilité des outils, entre autres, jouent un rôle clé dans leur acceptation et adoption par les utilisateurs [Molino et al. 2020] [Molino, Cortese et Ghislieri, 2021]. L'intégration de systèmes d'IA collaboratifs dans l'industrie en est un exemple concret : lorsqu'ils sont conçus pour faciliter la coordination et la prise de décision partagée, ils améliorent globalement la performance opérationnelle [Passalacqua, Pellerin, Magnani, et al. 2024]. Cela souligne à quel point la **confiance** et la clarté d'utilisation conditionnent le comportement des opérateurs face aux technologies émergentes.

La dimension physique regroupe les facteurs relatifs à l'**ergonomie** et au confort lors de la manipulation de technologies immersives. Plusieurs études ont déjà souligné que ces aspects contribuent à réduire la **fatigue** et à renforcer la sécurité des opérateurs [De Lombaert et al. 2023]. De ce fait, l'optimisation de l'ergonomie et l'adaptation de l'environnement physique ne sont pas uniquement bénéfiques pour le **bien-être des travailleurs**, mais constituent également un levier majeur d'amélioration de la performance et de la qualité globale du travail.

Ces quatre dimensions, étroitement interconnectées, influencent de manière significative les résultats organisationnels et, par extension, la réussite des initiatives d'I5.0. Pour en tirer pleinement parti, il est essentiel de concevoir des solutions technologiques qui non seulement améliorent la productivité, mais préservent également le bien-être des opérateurs. En prenant en compte les effets cognitifs, psychosociaux, comportementaux et physiques des technologies immersives, les entreprises pourraient réconcilier performances organisationnelles et besoins humains, tout en se préparant aux défis émergents de l'industrie du futur.

3 REVUE DE LA LITTERATURE NARRATIVE : METHODOLOGIE ET RESULTATS

Pour approfondir de précédentes études et tenter de répondre aux QR formulées en Section 1, une requête déjà utilisée pour explorer les apports de l'IA [Joblot et al. 2023; Passalacqua et al. 2022] et de la RA [Joblot et al. 2023; Passalacqua et al. 2022] sur les FH a été reprise et complétée. Ainsi, le volet « Facteurs humains » s'appuie sur les mots clés de la revue systématique « Human-Centred AI in the Age of Industry 5.0: A Systematic Review Protocol » (en vert dans le tableau 1). À ces éléments, d'autres mots-clés ont été ajoutés pour intégrer les thématiques liées au LEAN et aux technologies telles que la RV, la XR et les JN.

Tableau 1. Synthèse des mots clés utilisés
(/ prend ici la place de **OR**)

	Facteurs humains	LEAN	Technologie
Données cherchées	human centered/ user centered/ human centred / user / human factor*/ ux/ ergonom*/ sociotechnical/ trust/ socio-technical/ anthropocentric/ psychosocial/ psychophysiolog*/ motivation/ engagement/ stress/ cognitive load/ cognitive workload/ fatigue/ well being/ well-being/ empowerment / distrust/ acceptance/ acceptability/ attention/ personality/ comprehensib*/ understandab*/ explainab*/ vigilance/ engagement/ job satisfaction/ work satisfaction/ usability/ focus/ User Experience/ autonomy/ concentration/	LEAN	Digital Twin /Virtual reality / RV / VR / mixed reality / XR

En interrogeant la base de données Scopus avec ces mots-clés combinés (TITLE-ABS-KEY), seulement 27 articles ont été identifiés en date du 2 janvier 2025 traitant à la fois des thèmes LEAN, des technologies {RV, XR ou JN} à la lumière des FH.

3.1 Mesures d'exclusions

Après une lecture approfondie des 27 articles, il s'avère que 10 sont hors sujet. Le contexte ou les sujets abordés ne concernent pas le LEAN dans un contexte manufacturier. Le terme "LEAN" étant, par exemple, utilisé parfois pour étudier l'inclinaison de parties du corps durant des expérimentations en RV. D'autre part, certaines études comme celle de [Kovács 2018] s'intéressent à l'optimisation de la chaine de production par l'utilisation de méthodes agiles ou LEAN mais le caractère « virtuel » correspond uniquement à la dimension partenariale d'un réseau d'entreprises imaginées pour le projet. [Sepasgozar et al. 2020] présentent par ailleurs une étude bibliographique de l'utilisation du BIM pour atteindre des objectifs LEAN, en mettant en évidence les lacunes d'intégration de l'IoT au BIM dans des projets de construction pour en améliorer l'efficacité. Elle sera toutefois écartée car sans considération pour la dimension et l'impact sur l'humain.

Enfin, [Cardona-Reyes et al. 2021] présentent une étude « hors sujet » toutefois intéressante, proposant un modèle de processus LEAN UX pour concevoir des environnements de RV centrés sur l'utilisateur adaptés aux besoins des enfants atteints de TDAH dans un contexte scolaire. Dans une certaine mesure les préconisations apportées pourraient être exploitées sur certaines lignes très spécifiques, ou dans certaines entreprises adaptées. Cette ouverture serait envisageable, par exemple, dans des contextes manufacturiers spécifiques

rencontrant un fort taux d'illettrisme ou de difficultés langagières.

3.2 Articles retenus

Compte tenu du nombre faible d'articles retenus (9), la présentation des résultats se fera sous forme de revue de la littérature narrative. Parmi les 9 articles, 5 s'intéressent au secteur du bâtiment (notamment à travers des réflexions sur le BIM ou le Last Planner System (LPS)) et 4 abordent des problématiques liées au secteur manufacturier et à la production.

Le LPS est un outil d'optimisation de la planification et du contrôle de l'avancement, souvent utilisé dans le LEAN Construction. Dans cet outil participatif, le « Last Planner » correspond à la personne qui réalise ou supervise le travail dont il est question [Ballard 2020]. A 3 reprises les études traitent de RV seule, 5 autres articles s'intéressent uniquement au JN. L'étude proposée par Zhang et al. évoque, quant à elle, quelques synergies possibles entre ces 2 technologies [Zhang et al. 2021].

Au-delà des résultats synthétisés dans le Tableau 2, quelques résultats empiriques relatifs à nos QR méritent d'être relevés.

Des experts (principalement d'Inde) confirment que le LEAN et les JN combinés peuvent réduire considérablement la mauvaise qualité, les coûts et les incertitudes, répondant ainsi aux principes fondateurs du LEAN [Maheshwari and Devi 2024]. Les auteurs de cette étude rappellent toutefois qu'aucune mesure quantitative n'a pu étayer leurs affirmations et que les préjugés (positifs) des experts choisis ont pu influencer les résultats de l'étude.

Une étude de [Ybañez and De La Cruz 2023] sur le modèle 5D analyse les défis et opportunités des plateformes logicielles, comme la CAO 3D, combinées à des environnements virtuels, couvrant toutes les phases d'un projet d'ingénierie et de construction (aligné avec des principes LEAN). Contrairement au principe du BIM 5D classique, ce modèle repose sur des recherches théoriques et des avis d'experts, sans la moindre donnée issue du terrain ni aucune évaluation d'impact. Les auteurs suggèrent, sans preuve empirique, que leur approche pourrait améliorer compétitivité, sécurité, qualité et performances.

Les travaux de [Liu, González, Lee, Cabrera-Guerrero, and Zou 2024] et [Liu, González, Lee, Cabrera-Guerrero, Zou, et al. 2024] explorent l'impact du LPS sur les interactions sociales et les schémas physiologiques lors des réunions de coordination. Les auteurs révèlent des différences significatives dans les phases d'interaction entre les équipes non-LEAN et celles pratiquant le LPS, soulignant ainsi l'importance des étapes itératives de négociation et d'identification intrinsèques à ce mode. Cependant, l'usage de la RV se limite à rendre possible l'expérience et valider l'intérêt du LPS dans la construction, sans conclure sur un apport de cette technologie vis-à-vis du système LEAN en place.

Dans un contexte manufacturier, [Barni et al. 2020] étudient l'application d'un JN à une ligne de production en petites séries avec une forte variabilité des cycles. L'intégration d'un JN synchronisé avec le système de planification a réduit significativement les retards, grâce à la combinaison d'outils LEAN robustes et de la flexibilité apportée par le JN. Cependant, les résultats se concentrent uniquement sur la productivité, sans aborder les FH.

[Kim and Lee 2023] analysent l'évolution de la recherche sur la personnalisation de masse, en explorant les publications scientifiques, les tendances et l'impact des technologies émergentes. Cependant, leur étude bibliographique reste macro, avec peu d'intérêt pour le LEAN ou pour les impacts physiques, psychologiques ou cognitifs de la RV ou des JN.

Pour leur part, [He et al. 2021] présentent une application du BIM pour connecter conception informatisée et fabrication numérique de logements modulaires. Proche d'un JN, leur cadre de simulation virtuelle explore l'optimisation de l'impression 3D, limitée à des maquettes réduites. L'impact humain se résume à la réduction possible de la masse salariale, tandis que le LEAN n'intervient que dans la réflexion sur la préfabrication, un des autres leviers clé du LEAN construction.

[Guo and Mantravadi 2024] évoque un renforcement des chaînes d'approvisionnement LEAN grâce aux JN. Leur revue de 33 articles sélectionnés parmi 759 publications révèle que les JN sont majoritairement utilisés pour la planification, la fabrication et la livraison, mais peu pour l'approvisionnement et les services de retours de produits. Ils contribuent aux pratiques LEAN en améliorant le flux d'informations, en réduisant les gaspillages et en facilitant la production juste-à-temps. Les FH restent en revanche peu étudiés, à l'exception de réflexions sur l'engagement de la direction et la gestion des relations clients/fournisseurs.

L'article le plus proche de nos interrogations et ayant croisé les réflexions sur le LEAN, la RV et un système d'information apparenté à un JN, traite de la personnalisation de masse facilitée par l'utilisation de cette RV lors de l'étude d'implantation de meubles de cuisine par différents clients (simulés par 6 chercheurs et 2 menuisiers) [Zhang et al. 2021]. Cette étude est la plus intéressante à nos yeux même s'il ne contient pas de mesure d'impact sur les opérateurs dans l'entreprise. La plateforme VR-BIM, présentée à la Figure 2, a réduit les temps de conception, amélioré la communication, augmenté la productivité et diminué les attentes. Cette « combinaison » et l'ensemble des flux d'informations qui la compose, renforcent l'expérience et l'engagement client, mais aucun impact n'a été mesuré sur les équipes et opérateurs en place dans l'entreprise.

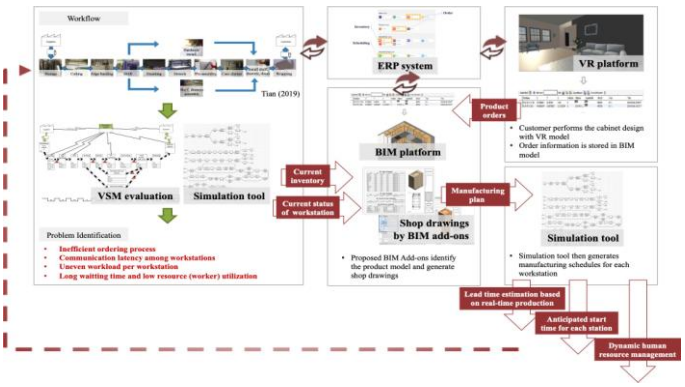


Figure 2. Aperçu général de l'étude de cas proposée par [Zhang et al. 2021]

Tableau 2. Principaux contenus des 9 articles retenus (M pour Secteur Manufacturier et C pour Construction)

Article	RV	JN	Contexte		Modalité expérimentale	Sujets abordés	Lacunes identifiées
			M	C			
[Maheshwari and Devi 2024]		O	O		Approche mixte revue approfondie de la littérature + entretiens	Relation entre les JN et le LEAN Six Sigma	Aucune étude d'impact FH
[Barni et al. 2020]		O	O		Simulation / transposition à un outil de production existant	Application d'un JN sur une ligne de production en pièce à pièce soumise à une grande variabilité des temps de cycle. QR : Comment les pertes de performance induites par la variabilité des temps de cycle peuvent être récupérées grâce au JN ?	Aucune étude d'impact FH
[Kim and Lee 2023]	O		O		Approche quantitative	Analyse "quantitative" d'un historique et des tendances révélées dans 1947 articles et s'intéressant à la personnalisation de masse plutôt qu'au LEAN	Aucune étude d'impact FH
[Guo and Mantravadi 2024]		O	O		Revue de la littérature	Rôle des JN sur la supply chain LEAN Etude très Macro, loin du terrain et des opérateurs	Aucune relation aux FH
[Ybañez and De La Cruz 2023]		O		O	Revue et interview	Analyse des défis et les opportunités des plateformes logicielles (CAO 3D combinées à des environnements virtuels ou distants (équivalent ici au JN) couvrant toutes les phases d'un projet d'ingénierie et de construction (parfois géré selon des principes LEAN).	Aucune donnée, avis d'experts,
[Liu, González, Lee, Cabrera-Guerrero, and Zou 2024]	O			O	Prototype et étude de cas	Ces 2 articles se complètent : développement d'un environnement expérimental basé sur la RV immersive pour comprendre l'impact du LPS sur les interactions sociales et les schémas physiologiques de groupe lors des réunions de coordination	La RV ne sert pas le LEAN, mais est utilisé pour valider l'intérêt du LPS
[Liu, González, Lee, Cabrera-Guerrero, Zou, et al. 2024]	O			O			
[Zhang et al. 2021]	O	O		O	Prototype et étude de cas (+ interview)	Test d'un prototype de SI intégrant les technologies VR, BIM, simulation par événements discrets et d'ERP facilitant la mise en œuvre de la personnalisation de masse. L'étude s'appuie également sur des outils LEAN tels que la VSM, Gemba Walks , la chasse aux gaspillages….	Les FH analysés ne concernent pas la politique ou les acteurs LEAN de l'entreprise mais seulement le client
[He et al. 2021]		O		O	Développement numérique et étude de cas	Application du BIM pour lier la conception informatisée et la fabrication numérique de logements modulaires. Le dev réalisé pourrait s'apparenter à un JN	Aucune étude d'impact FH

La vision « human-centric » semble donc rarement au cœur des dispositifs et des travaux mixant le LEAN, les JN ou les solutions de RV.

Pour l'analyse d'impact de ces technologies immersives, en dehors du contexte LEAN et au delà de la présente revue de littérature, l'étude intitulée « A systematic review of wearable biosensor usage in immersive virtual reality experiences » est apparue intéressante au fil de nos recherches [Guillen-Sanz et al. 2024]. Cette étude porte sur les biocapteurs portables susceptibles d'être intégrés aux protocoles scientifiques. Les techniques mises en avant, telles que la mesure de l'activité électrodermale, neuronale, musculaire ou le suivi oculaire, s'alignent pleinement avec nos objectifs futurs (cf. 2.4). Les auteurs anticipent une généralisation de ces technologies, ouvrant la voie à des avancées significatives pour nos recherches et facilitant ainsi la transition vers l'ère de l'I5.0. Néanmoins, leur intégration est encore parfois jugée trop intrusive. Cela pourrait ralentir l'exploitation complète de leur potentiel. L'utilisation du biofeedback, basé sur des mesures en temps réel des impacts physiques, psychologiques et cognitifs des technologies étudiées, restera donc un défi encore pendant quelque temps. Cette complexité pourrait être particulièrement visible sur des lignes de production misant principalement sur la valeur ajoutée générée avant tout par le potentiel humain.

Force est donc de constater que les impacts sur les FH lors de l'implantation ou à l'utilisation de JN ou de RV sont nullement explicitement évoqués ni caractérisés dans les neuf articles retenus. Le rapport «JN. Levier majeur de la transformation digitale »[8] promettait de nombreux gains et impacts de ces technologies sur des questions abordées lors du déploiement ou de l'animation du LEAN en entreprise, à savoir :*la résolution de problèmes, la détection d'erreurs, la recherche des causes racines, l'optimisation des espaces de travail, des flux ou des cadences, l'ordonnancement, la standardisation et la formation au poste*. Les résultats de notre revue et les manques constatés concernant ces différents effets sur les opérationnels nous incitent donc à quelques règles de prudence, tout en soulignant que de nombreuses perspectives s'ouvrent face aux défis de compréhension des mécanismes d'implantation et, au fond, d'acceptation des technologies prônées par l'I5.0.

4 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

À la lumière de nos résultats, peu de preuves empiriques existent pour illustrer l'utilisation et les impacts sur divers FH des technologies immersives (JN ou RV) dans des contextes industriels LEAN. Cette étude met en évidence la difficulté, pour un industriel engagé dans des programmes LEAN, de cerner l'ensemble des enjeux face à l'intégration de telles technologies dans le contexte de l'I5.0. L'absence de données quantitatives et qualitatives suffisantes pour évaluer avec certitude les impacts physiques, psychologiques ou cognitifs sur les opérateurs, souligne que les complémentarités ou incompatibilités entre ces technologies et les démarches LEAN sont encore à explorer. Cette politique d'organisation, bâtie sur le principe de l'amélioration continue, appelle souvent à se concentrer sur le terrain et à privilégier le pragmatisme avant d'investir dans des technologies coûteuses qui ne résolvent pas toujours les dysfonctionnements opérationnels. Toutefois, ces lacunes et la présente revue de la littérature ouvrent des perspectives prometteuses et offrent des enseignements clés.

Parmi les axes de travaux futurs permettant d'affiner les QR retenues, il conviendra d'approfondir notre travail bibliographique au-delà d'une veille continue, notamment sur les résultats des récents projets JENII. Une revue complémentaire visant à vérifier si certains principes ou logiques LEAN (comme le TPM, le Jidoka et le Juste-à-Temps) ont été étudiés dans des travaux sans explicitement mentionner le terme LEAN sera ainsi menée ultérieurement. Cet approfondissement pourrait révéler des impacts indirects ou implicites liés à des approches LEAN ou apparentées.

Le manque de données quantitatives souligne par ailleurs l'importance de poursuivre le lancement d'expérimentations en

[8] http://www.industrie-dufutur.org/content/uploads/2023/05/AIF_JumeauNumerique_FR-version-Web.pdf

environnements réels, rendues possibles, par exemple, par les usines-écoles et le dispositif ELF de l'ENSAM. Des mesures pourraient également être réalisées en lançant des études longitudinales en entreprise. Cela justifie le développement et le lancement prochains de tests d'applications de RV à usages tant pédagogiques que scientifiques. Ces dernières seront intégrées au processus de formation LEAN et leur impact sur les apprenants sera mesuré, en mode "learning by doing", via le « Utrecht work engagement scale-9 » [Schaufeli et al. 2003]. Elles pourront également compléter des expérimentations scientifiques récentes ayant permis l'étude des impacts parfois combinés de l'IA, de la RA et du biofeedback en environnement industriel [Joblot et al. 2023; Passalacqua, Pellerin, Yahia, et al. 2024].

L'intégration de ces technologies immersives doit cependant s'aligner avec les fondamentaux du LEAN, notamment l'amélioration continue. Ces applications de XR ne doivent pas rigidifier les processus. En plus de répondre aux exigences de flexibilité, elles doivent pouvoir s'adapter à des environnements en constante évolution et être conçues pour soutenir les opérateurs, quels que soient leurs difficultés ou handicaps. Étant donné que 70 % des TPE/PME françaises consacrent moins de 2 000 euros par an au numérique, nous chercherons également à rendre ces solutions 'ouvertes', financièrement abordables et facilement maintenables, afin de les adapter aux petites structures ayant déployé des stratégies LEAN.

Nous pouvons enfin rappeler que les études prometteuses révélées par notre analyse proviennent autant du secteur manufacturier que de la construction. Certains travaux mixent RV et JN, et ces technologies se greffent désormais très régulièrement à l'incontournable IA. Cela confirme, selon nous, l'importance de décloisonner les disciplines scientifiques pour identifier des hypothèses d'impact à transposer et à valider dans des contextes variés.

Pour conclure, l'enthousiasme grandissant pour ces technologies, ainsi que la nécessité de continuer à mesurer leur impact sur les opérateurs LEAN, offrent une opportunité précieuse pour le milieu scientifique et académique. Les connaissances actuelles et futures s'intégreront harmonieusement et enrichiront de manière significative les approches pédagogiques et les contenus de formation de nos Evolutive Learning Factories et "LAB LEAN 5.0", actuellement en construction à Cluny.

5 REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié du soutien du projet NCU RITM-BFC portant la référence ANR-17- NCUN-0003

6 REFERENCES

Ballard, G. [2020] "The Last Planner System," *Lean Construction*, Routledge.

Balle, M., and Balle, F. [2009] "The lean manager: a novel of lean transformation. 1st Edi-tion. Lean Enterprise Institute," Inc.

Barni, A., Pietraroia, D., Züst, S., West, S., and Stoll, O. [2020] "Digital twin based optimization of a manufacturing execution system to handle high degrees of customer specifications," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, MDPI, Vol. 4, No.4, p. 109.

Beaudoin, J., Lefebvre, G., Normand, M., Gouri, V., Skerlj, A., Pellerin, R., Rivest, L., and Danjou, C. [2016] *Prendre part à la révolution manufacturière? Du rattrapage technologique à l'Industrie 4.0 chez les PME*, Centre francophone d'informatisation des organisations (CEFRIO).

Cardona-Reyes, H., Muñoz-Arteaga, J., Villalba-Condori, K., and Barba-González, M. L. [2021] "A lean ux process model for virtual reality environments considering adhd in pupils at elementary school in covid-19 contingency," *Sensors*, MDPI, Vol. 21, No.11, p. 3787.

Cedric, F., and Fernagu, S. [2023] *Livre Blanc " Enseigner avec des jumeaux numériques immersifs et interactifs ,"* CESI, 10.58156/reliam/2023/0016.

De Lombaert, T., Braekers, K., De Koster, R., and Ramaekers, K. [2023] "In pursuit of humanised order picking planning: methodological review, literature classification and input from practice," *International Journal of Production Research*, Vol. 61, No.10, pp. 3300–3330.

Direction générale de la recherche et de l'innovation (Commission européenne), Breque, M., De Nul, L., and Petridis, A. [2023] *Industrie 5.0: vers une industrie européenne durable, centrée sur l'humain et résiliente*, Office des publications de l'Union européenne, LU.

Fani, V., Bucci, I., Rossi, M., and Bandinelli, R. [2024] "Lean and industry 4.0 principles toward industry 5.0: a conceptual framework and empirical insights from fashion industry," *Journal of Manufacturing Technology Management*, Emerald Pub, Vol. 35, No.9, pp. 122–141.

Faure, V., Chardonnet, J.-R., Mestre, D., Ferlay, F., Brochier, M., Joblot, L., Merienne, F., and Andriot, C. [2023] "Transfer of nuclear maintenance skills from virtual environments to reality-Toward a methodological guide," *AHFE 2023-14th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*, AHFE Int, pp. 99–107.

Goujon, A., Rosin, F., Magnani, F., Lamouri, S., Pellerin, R., and Joblot, L. [2024] "Industry 5.0 use cases development framework," *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, Vol. 0, No.0, pp. 1–26.

Grieves, M. W. [2005] "Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises," *International Journal of Product Development*, Vol. 2, No.1–2, pp. 71–84.

Grosse, E. H., Sgarbossa, F., Berlin, C., and Neumann, W. P. [2023] "Human-centric production and logistics system design and management: transitioning from Industry 4.0 to Industry 5.0," *International Journal of Production Research*, Vol. 61, No.22, pp. 7749–7759.

Guillen-Sanz, H., Checa, D., Miguel-Alonso, I., and Bustillo, A. [2024] "A systematic review of wearable biosensor usage in immersive virtual reality experiences," *Virtual Reality*, Vol. 28, No.2, p. 74.

Guo, D., and Mantravadi, S. [2024] "The role of digital twins in lean supply chain management: review and research directions," *IJPR*, pp. 1–22.

He, R., Li, M., Gan, V. J., and Ma, J. [2021] "BIM-enabled computerized design and digital fabrication of industrialized buildings: A case study," *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, Vol. 278, p. 123505.

Joblot, L., Florian, M., Rosin, F., Pellerin, R., and Passalacqua, M. [2023] "Protocole expérimental visant l'étude de l'IA centrée sur l'humain dans le contexte de l'Industrie 5.0 : Application en réalité augmentée," *CIGI QUALITA MOSIM 2023*, Trois Rivières, Canada.

Kim, S., and Lee, K. [2023] "The paradigm shift of mass customisation research," *International Journal of Production Research*, Vol. 61, No.10, pp. 3350–3376.

Kovács, G. [2018] "Novel supply chain concepts and optimization of virtual enterprises to reduce cost, increase

productivity and boost competitiveness," *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, Vol. 66.
Krafcik, J. F. [1988] "Triumph of the lean production system," *MIT Sloan Management Review*, Vol. 30, No.1, p. 41.
Liu, C., González, V. A., Lee, G., Cabrera-Guerrero, G., and Zou, Y. [2024] "Understanding Social Interaction and Physiological Patterns in Nonlean and Last Planner System–Based Project Teams: A Comparative Study Using Immersive Virtual Reality," *Journal of Construction Engineering and Management*, American Society of Civil Engineers, Vol. 150, No.10, p. 04024131.
Liu, C., González, V. A., Lee, G., Cabrera-Guerrero, G., Zou, Y., and Davies, R. [2024] "Integrating the Last Planner System and Immersive Virtual Reality: Exploring the Social Mechanisms Produced by Using LPS in Projects," *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 150, No.7, p. 04024070.
Longo, F., Nicoletti, L., and Padovano, A. [2019] "Modeling workers' behavior: A human factors taxonomy and a fuzzy analysis in the case of industrial accidents," *Int. J. Ind. Ergon.*, Elsevier, Vol. 69, pp. 29–47.
Maheshwari, P., and Devi, Y. [2024] "Investigating the relationship between Lean Six Sigma performance strategy with digital twin modeling: Practices and factors," *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, Vol. 436, p. 140449.
Mateev, M. [2020] "Industry 4.0 and the digital twin for building industry," *Industry 4.0*, Scientific Technical Union of Mechanical Engineering" Industry 4.0", Vol. 5.
Mihai, S., Yaqoob, M., Hung, D. V., Davis, W., Towakel, P., Raza, M., Karamanoglu, M., Barn, B., Shetve, D., and Prasad, R. V. [2022] "Digital twins: A survey on enabling technologies, challenges, trends and future prospects," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, Vol. 24, No.4, pp. 2255–2291.
Modig, N., and Åhlström, P. [2012] *This is lean: Resolving the efficiency paradox*, Rheologica Stockholm.
Molino, M., Cortese, C. G., and Ghislieri, C. [2020] "The promotion of technology acceptance and work engagement in industry 4.0: From personal resources to information and training," *International journal of environmental research and public health*, MDPI, Vol. 17, No.7, p. 2438.
Neumann, W. P., Winkelhaus, S., Grosse, E. H., and Glock, C. H. [2021] "Industry 4.0 and the human factor–A systems framework and analysis methodology for successful development," *International journal of production economics*, Elsevier, Vol. 233, p. 107992.
Passalacqua, M., Pellerin, R., Doyon-Poulin, P., Del-Aguila, L., Boasen, J., and Léger, P.-M. [2022] "Human-Centred AI in the Age of Industry 5.0: A Systematic Review Protocol," *HCI International 2022 – Late Breaking Papers: Interacting with eXtended Reality and Artificial Intelligence: 24th International Conference on Human-Computer Interaction, HCII 2022, Virtual Event, June 26 – July 1, 2022, Proceedings*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 483–492.
Passalacqua, M., Pellerin, R., Magnani, F., Doyon-Poulin, P., Del-Aguila, L., Boasen, J., and Léger, P.-M. [2024] "Human-centred AI in industry 5.0: a systematic review," *International Journal of Production Research*, pp. 1–32.
Passalacqua, M., Pellerin, R., Yahia, E., Magnani, F., Rosin, F., Joblot, L., and Léger, P.-M. [2024] "Practice With Less AI Makes Perfect: Partially Automated AI During Training Leads to Better Worker Motivation, Engagement, and Skill Acquisition," *International Journal of Human–Computer Interaction*, pp. 1–21.
"Rapport étude de marché CNXR 2023 V.1." [2023] *calameo.com*, < https://urlr.me/yzaHmp> (Jan. 12, 2025).
Rosin, F., Forget, P., Lamouri, S., and Pellerin, R. [2019] "Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean principles," *International Journal of Production Research*, Vol. 0, No.0, pp. 1–18.
Saabye, H., Powell, D., and Hines, P. [2024] "The microfoundations of lean leadership: Monozukuri, Hitozukuri, Kotozukuri," *Total Quality Management & Business Excellence*, Routledge.
Schaufeli, W. B., Bakker, A. B., and Salanova, M. [2003] "Utrecht work engagement scale-9," *Educational and Psychological Measurement*.
Sepasgozar, S. M., Hui, F. K. P., Shirowzhan, S., Foroozanfar, M., Yang, L., and Aye, L. [2020] "Lean practices using building information modeling (Bim) and digital twinning for sustainable construction," *Sustainability*, MDPI, Vol. 13, No.1, p. 161.
Sgarbossa, F., Grosse, E. H., Neumann, W. P., Battini, D., and Glock, C. H. [2020] "Human factors in production and logistics systems of the future," *Annual Reviews in Control*, Elsevier, Vol. 49, pp. 295–305.
SUGIMORI, Y., KUSUNOKI, K., CHO, F., and UCHIKAWA, S. [1977] "Toyota production system and Kanban system Materialization of just-in-time and respect-for-human system," *THE INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, Taylor & Francis Group.
Yahia, E., Magnani, F., Joblot, L., Passalacqua, M., and Pellerin, R. [2024] "Exploring the Effects of Industry 4.0/5.0 on Human Factors: A Preliminary Systematic Literature Review," *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier, Vol. 58, No.19, pp. 539–544.
Ybañez, R. S., and De La Cruz, A. R. [2023] "Related Literature Review 5D Model for Project and Operation/Maintenance Remote Monitoring of Equipment and Piping System.," *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, Vol. 56, No.3.
Zhang, Y., Wang, J., Ahmad, D. R., and Li, X. [2021] "Integrating Lean Production Strategies, Virtual Reality Technique, and Building Information Modelling Method for Mass Customization in Cabinet Manufacturing," *Engineering Construction & Architectural Management*, Vol. ahead-of-print.

CIGI QUALITA MOSIM 2025

Readiness et maturité numérique : Une confusion qui nuit à la transformation numérique des PME manufacturières ?

SEBASTIEN GAMACHE[1], MARIE CHARBONNEAU-GENEST[2]

[1] Université du Québec à Trois-Rivières
3351 boul. des Forges, Trois-Rivières, Québec, Canada.
sebastien.gamache@uqtr.ca
[2]marie.charbonneau-genest@uqtr.ca

***Résumé* – Depuis 2011, l'Industrie 4.0 s'impose comme un moteur majeur de transformations organisationnelles, promettant des gains de productivité et une compétitivité accrue grâce aux technologies numériques. Malgré l'existence de nombreux modèles de maturité destinés à guider les entreprises dans leur transformation, on observe un manque de retombées concrètes dans les Petites et Moyennes Entreprises manufacturières, notamment au Québec. Afin de comprendre les causes sous-jacentes de ce phénomène, cette recherche analyse la confusion entre deux concepts clés : le readiness numérique et la maturité numérique. En s'appuyant sur une revue de littérature systématique et une analyse comparative, l'étude démontre que l'absence de distinction claire entre readiness et maturité nuit aux diagnostics et à l'efficacité des outils d'accompagnement. Les résultats soulignent que le readiness, de nature souvent binaire (prêt ou non), précède logiquement la maturité, décrite comme un continuum d'évolution. Cette clarification conceptuelle offre deux contributions principales : (1) l'optimisation des diagnostics en identifiant le point de départ des entreprises, (2) le renforcement du soutien stratégique, en ajustant les interventions selon le stade réel de transformation. Les conclusions invitent à développer des instruments de mesure spécifiques au readiness, ainsi qu'à évaluer l'impact de cette confusion sur le taux de réussite des projets numériques.**

***Abstract* – Since 2011, Industry 4.0 has been heralded as a major driver of organizational transformations, promising productivity gains and enhanced competitiveness through digital technologies. Despite numerous maturity models aiming to guide businesses in their digital transition, small and medium-sized enterprises often report limited tangible outcomes, as highlighted in the Quebec manufacturing sector. To address these shortcomings, this paper examines the confusion between two key concepts: *digital readiness* and *digital maturity*. Drawing on a systematic literature review and a comparative analysis, the study reveals that failing to distinguish between readiness and maturity undermines diagnostic accuracy and the effectiveness of accompanying tools. Findings show that readiness, typically considered a binary state (ready or not), logically precedes maturity, which is conceived as a continuum of development. Two main contributions emerge: (1) the improvement of organizational diagnoses by identifying each company's starting point, and (2) the strategic refinement of support mechanisms, wherein interventions can be tailored to an organization's actual phase of transformation. The paper concludes by recommending the creation of specialized readiness measurement instruments and suggests investigating the quantitative impact of this conceptual ambiguity on digital project success rates.**

***Mots clés* – Readiness numérique, Maturité numérique, Transformation numérique, Industrie 4.0, Revue de littérature.**
***Keywords* – Digital readiness, digital maturity, digital transformation, Industry 4.0, Literature Review**

1 INTRODUCTION

Depuis 2011, l'Industrie 4.0 est décrite comme un important vecteur de transformations dans les organisations (ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie, 2023). Elle annonce des gains de productivité grâce aux technologies numériques et à l'interconnectivité (Hébert, 2016) et représenterait un passage obligé pour les entreprises souhaitant demeurer compétitives (Zhang et al., 2021). Malgré plus de 7186 articles scientifiques consacrés à la « quatrième révolution industrielle » entre 2011 et 2023 (["quatrième révolution industrielle" OR "Fourth Industrial Revolution"] dans SCOPUS), le Baromètre Industriel Québécois (STIQ, 2024) montre que les entreprises manufacturières du Québec n'observent que très peu de gains concrets.

Plusieurs outils et modèles de maturité numérique se sont pourtant multipliés pour accompagner la transformation numérique : Jesus et Lima (2020) en recensent 41, et Bélanger et Gamache (2024) en dénombrent 96. De plus, le gouvernement du Québec finance, depuis 2017, l'élaboration d'un modèle de maturité numérique pour les entreprises (Investissement Québec, 2020), lequel a évolué au fil du temps (Chamberland, 2020). Malgré ces efforts, seuls 12 % des PME du Québec ont complété un Audit 4.0 (2017–2020), et seulement 7 % ont mis en œuvre un plan stratégique numérique (STIQ, 2020). En outre, 51 % des entreprises n'ont adopté aucune ou une seule technologie 4.0 (STIQ, 2023). Même parmi celles ayant intégré plusieurs technologies, Fareri et al. (2020) observent un besoin d'alignement interne pour maximiser le rendement de ces investissements, et Dassisti et al. (2019) et STIQ (2024) soulignent un manque global de retombées concrètes. Certains auteurs, comme Bélanger et Gamache (2024), remettent même en question l'efficacité des outils d'accompagnement et de maturité existants.

Certains de ces outils sont présentés comme des modèles de readiness, axés sur la préparation des entreprises au numérique (Pacchini et al., 2019). Toutefois, la littérature ne propose pas

toujours une démarcation claire entre readiness numérique et maturité numérique (Pacchini et al., 2019; Schumacher et al., 2016), ce qui pourrait nuire à l'efficacité de ces outils. D'où la question de recherche :

Y a-t-il une confusion marquée et problématique entre les concepts de readiness numérique et de maturité numérique dans la littérature scientifique?

Pour y répondre, il importe de distinguer explicitement le readiness et la maturité afin d'orienter correctement les entreprises vers des actions à forte valeur ajoutée. L'objectif de cet article est donc de démontrer l'existence de cette confusion et de proposer une distinction claire entre readiness numérique et maturité numérique, permettant ainsi de mieux adapter l'accompagnement en fonction du degré de préparation de chaque organisation et d'optimiser leurs probabilités de succès. La première section de cet article effectue une revue de la littérature sur l'Industrie 4.0. La deuxième section présente la méthodologie. La troisième compare et analyse les concepts de readiness numérique et de maturité numérique. La quatrième discute des résultats et souligne la distinction entre ces deux notions. Enfin, la conclusion met en évidence les contributions majeures de cette recherche et les perspectives futures.

2 REVUE DE LITTERATURE

Le terme Industrie 4.0 a émergé en Allemagne lors de la Foire de Hanovre en 2011 (Lasi et al., 2014). Malgré l'émergence de variantes comme Industry 5.0 ou Industrie X.0, aucun consensus ne s'est imposé sur la définition ni la portée concrète de l'Industrie 4.0. Plusieurs auteurs insistent d'abord sur l'intégration de technologies comme les Systèmes Cyber-Physiques et l'Internet des objets (Kagermann et al., 2013; Lasi et al., 2014; Kohler et Weisz, 2016). D'autres mettent l'accent sur les données en temps réel, lesquelles décentralisent la prise de décision (Kohler et Weisz, 2016; Danjou et al., 2017; Moeuf et al., 2018). Un troisième groupe focalise sur l'interconnectivité des systèmes (Tortorella et Fettermann, 2018; Li et al., 2017; Qin et al., 2016; Machado et al., 2019; Dilberoglu et al., 2017; Mosterman et Zander, 2016), visant un fonctionnement autonome et flexible de la production. Enfin, certains auteurs soulignent la création de valeur par la numérisation de bout en bout (Geissbauer et al., 2016) et la réduction de l'intervention humaine grâce à des processus automatisés (Jesus, et Oliveira, 2019). Malgré cette diversité, tous s'accordent sur l'idée que l'Industrie 4.0 repose sur l'implantation de technologies numériques menant à des systèmes intelligents, connectés et orientés vers l'optimisation des performances.

L'adoption de l'Industrie 4.0 répond notamment à la demande croissante de personnalisation de la part des clients, obligeant les entreprises à revoir leurs pratiques pour conserver leur compétitivité (Shahi et Sinha, 2021). Selon Posada et al. (2015) et Roblek et al. (2016), les impacts positifs se répartissent autour de cinq axes : (1) production personnalisée et optimisée, (2) automatisation et adaptabilité, (3) interaction humain-machine, (4) services à valeur ajoutée et (5) partage de données en temps réel. D'autres travaux soulignent des bénéfices tels que la création de valeur, l'amélioration de la compétitivité (Mahmood et al., 2019) et l'agilité face aux exigences variables (Dutta et al., 2020), tout en préservant la qualité grâce à l'Internet des objets (Wang et al., 2018) et en renforçant la satisfaction client (Singh et al., 2021). Les entreprises peuvent aussi réduire leurs coûts (Duman et Akdemir, 2021) ou augmenter leurs revenus (PwC Survey, 2016) via une meilleure utilisation des ressources et une productivité accrue (Singh et Bhanot, 2019).

Bien que la notion de transformation numérique existe depuis plusieurs décennies (Shahi et Sinha, 2021), l'Industrie 4.0 lui a donné un nouvel élan. Le premier article abordant cette transformation dans le contexte de l'Industrie 4.0 (Bauer et al., 2015) souligne la nécessité de repenser tant les structures techniques que les ressources humaines. La transformation numérique se définit comme un changement fondamental dans la forme et la structure de l'organisation, rendu possible par l'adoption de technologies numériques (Gong et Ribiere, 2021; Berman, 2012). Pour réussir ce type de transformation, il importe d'impliquer plusieurs parties prenantes (Teichert, 2019) et de partager une vision commune afin de prioriser les initiatives (Berghaus et Back, 2016). Selon Matt et al. (2015), la notion de « transformation » renvoie à un changement fondamental qui impacte la stratégie et la structure, tandis que numérique implique une manière inédite de gérer l'entreprise (Dörner et Edelman, 2015) en créant de la valeur, en optimisant les processus par les technologies numériques. Divers auteurs précisent que ce processus est progressif, s'appuyant sur de multiples innovations (Rodríguez-Abitia et al., 2021; Skog et al., 2018), et doit générer un impact disruptif sur le modèle d'affaires (Morakanyane et al., 2017; Henriette et al., 2016). Bien qu'il n'existe pas de consensus de définition (Jones et al., 2021), Vial (2021) la décrit comme un ensemble de changements visant à améliorer une entité via les technologies connectées. Le succès dépend toutefois de l'engagement des individus (Kane, 2019; Larjovuori et al., 2016) et peut entraîner des bouleversements majeurs au niveau des opérations, des compétences ou même de l'identité organisationnelle (Reis et al., 2018; Wessel et al., 2021).

3 METHODOLOGIE

Afin de répondre à l'objectif, nous avons mené une revue de littérature ciblée et structurée autour de ces deux concepts d'intérêt. Cette démarche visait (1) à vérifier si la littérature emploie ces concepts de manière confuse ou interchangeable, et (2) à comparer leurs définitions et caractéristiques, dans le but de proposer une distinction claire et opérationnelle. Le protocole d'identification, de tri et de sélection des articles est présenté ci-dessous et synthétisé dans le Tableau 1.

3.1 Collecte des données

Nous avons interrogé la base de données SCOPUS (10 février 2024) avec les termes [digital AND readiness] et [digital AND maturity], puis avec les expressions exactes "digital readiness" et "digital maturity" (#1). Pour affiner la pertinence (#2), nous avons exclu les articles dont les mots-clés ou domaines étaient sans lien avec la transformation numérique. Nous avons également limité la recherche à l'anglais et au français, et aux types de documents « articles », « articles de conférence », « livres » et « chapitres de livre ». Puis, afin d'investiguer la confusion auprès des travaux les plus influents (#3.1), nous avons ordonné les résultats par nombre de citations (SCOPUS) et conservé ceux qui en comptaient au moins 30. Lorsqu'une requête ne fournissait pas 30 articles pertinents (#3.2), le seuil minimal était abaissé par paliers de 10 jusqu'à obtenir un ensemble d'au moins 30 documents. Les articles correspondant à la recherche, mais dont le titre ou le résumé n'abordait pas clairement le readiness numérique ou la maturité numérique, ont été écartés (#4). Seuls les articles disponibles via le portail universitaire, ou en accès libre, ont été retenus (#5). Enfin, tout article non pertinent après lecture intégrale a été exclu (#6). Les documents finaux devaient présenter : (a) une définition ou des caractéristiques du readiness numérique et/ou de la maturité

numérique, (b) d'éventuelles confusions entre ces deux concepts ou (c) une clarification explicite de leur distinction. Le Tableau 1 synthétise les résultats à chaque étape.

Tableau 1. Résultats de la revue de littérature

Étape	Mots-clés / Qté obtenus	digital AND readiness	"digital readiness"	"digital" AND "maturity"	"digital maturity"
#1	Qté. Total d'articles	3 969	262	4 349	639
#2	Qté. Article avec limitations/exclusions	1 780	148	2 076	395
#3.1	Qté. Article respectant (n> 30 citations)	136	19	175	29
3.2	Qté. Article respectant (min 30 > x citation)	-	x=10 N = 42	-	x= 20 N = 39
#4	Qté. Articles potentiels (intérêt titres/sommaires)	56	29	65	34
#5	Qté. Article accessibles	53	23	56	30
#6	**Qté. Articles retenus pour pertinence**	**41**	**19**	**42**	**22**

3.2 Analyse des données

Pour confirmer (1) l'existence d'une réelle confusion dans la littérature et (2) d'établir deux définitions distinctes de readiness numérique et la maturité numérique, nous avons retenu la définition du Larousse (2023) : « action de prendre quelque chose ou quelqu'un pour autre chose ou quelqu'un d'autre ». Nous avons vérifié si ces articles cités et influents alimentaient la confusion (employer readiness et maturité de façon interchangeable) ou, au contraire, la clarifiaient. Nous avons ensuite dressé un parallèle entre le readiness et la maturité au niveau des méthodes d'évaluation employées, des dimensions associées à chaque concept et des similitudes et différences majeures.

4 RESULTATS

4.1 Readiness numérique

Après l'application des critères de sélection, 74 articles ont été jugés potentiellement pertinents et 47 ont finalement été retenus. Ceux-ci offrent 24 définitions distinctes, regroupées en quatre grands axes :

Le readiness comme phase de préparation globale.

Il s'agit de l'état qui précède le lancement d'un projet ou d'une initiative, englobant les dimensions psychologiques, structurelles et ressources (humaines, financières, etc.) nécessaires pour amorcer l'action (Pacchini et al., 2019; Klein et Sorra, 1996; Helfrich et al., 2011; Caiado et al., 2021). Cette préparation globale permet à l'organisation de mesurer sa volonté et sa capacité à s'engager dans une nouvelle démarche (Lokuge et al., 2019; Gfrerer et al., 2021).

Le readiness comme volonté d'adaptation au changement.

Plusieurs auteurs associent le readiness à l'acceptation et à la gestion d'un changement organisationnel, incluant la communication interne et la coordination entre les parties prenantes (Zoltners et al., 2021; Hussain et Papastathopoulos, 2022). L'objectif est d'assurer une cohésion suffisante pour favoriser l'apprentissage, la flexibilité et la confiance collective dans l'aptitude à mener à bien les transformations (Jun et al., 2021; Singh et al., 2021).

Le readiness à l'égard des technologies.

Le readiness touche également la propension (individuelle ou collective) à adopter, assimiler et exploiter de nouvelles solutions numériques, ce que Parasuraman et Colby (2015) nomment le *technology readiness*. Il s'agit d'évaluer les compétences internes, l'adéquation des infrastructures et la posture de l'organisation face à l'innovation (Mishra et al., 2018; Jeong et Lee, 2015; Holmström, 2022).

Le readiness dans la transformation numérique.

Certains travaux envisagent le readiness numérique comme un préalable indispensable pour engager un processus de digitalisation : il faut disposer d'un alignement stratégique, d'une culture orientée vers l'innovation et d'équipes formées (Machado et al., 2021; Brozzi et al., 2021; Flechsig et al., 2022). Dans ce contexte, le readiness couvre à la fois la volonté de réviser les modèles d'affaires et la capacité organisationnelle à initier la transformation (Charbonneau-Genest et Gamache, 2020).

Enfin, les études soulignent que le readiness peut être binaire (être prêt / ne pas l'être) ou évolutif, où l'on évalue progressivement le degré de préparation (Arthur-Nyarko, et al., 2020; Giang et al., 2021; Hong et Kim, 2018; Pacchini et al., 2019). Par ailleurs, de nombreux facteurs d'influence sont mentionnés (compétences, leadership, engagement, culture, etc.), ainsi que des piliers pouvant favoriser ou freiner la préparation (optimisme, innovation, inconfort, insécurité) (Mishra et al., 2018; Almaiah et al., 2022; Jafari-Sadeghi et al., 2021). Plusieurs auteurs considèrent enfin le readiness comme une condition de succès à l'adoption technologique ou au changement visé (De Carolis et al., 2017; Kim et al., 2019; Singh et al., 2021; Zhu et al., 2006). Cette perspective amène certains travaux à l'identifier comme la première étape d'un parcours de transformation numérique (Charbonneau-Genest et Gamache, 2020; Machado et al., 2019).

4.2 Maturité numérique

Sur 81 articles jugés potentiellement pertinents, 55 ont été retenus, présentant 26 définitions. Nous les avons regroupées en trois grandes orientations :

Une évolution sur un chemin anticipé.

Inspirés de Crosby (1979), plusieurs auteurs (Röglinger et al., 2012; Mittal et al., 2018; Schumacher et al., 2016; Colli et al., 2019) voient la maturité comme un processus progressif jalonné d'étapes, aboutissant à un état « parfait » ou « avancé ». Cette notion sert également de fondement aux modèles de maturité pour planifier l'évolution organisationnelle (Teichert, 2019; Borštnar et Pucihar, 2021).

L'engagement continu face au changement.

Certains travaux (Ariffin et Ahmad, 2021; North et al., 2020; Ifenthaler et Egloffstein, 2020; Eremina et al., 2019; Nasiri et al., 2022) considèrent la maturité comme la volonté de s'adapter aux bouleversements induits par les technologies. Le degré de maturité reflète alors la capacité à améliorer sans cesse les processus en réaction à un environnement numérique évolutif (Machado et al., 2019; Caiado et al., 2021).

La maturité numérique dans la transformation numérique.

Plusieurs auteurs (He et al., 2023; Issa et al., 2018; Kane et al., 2018; Bartsch et al., 2021; Ghobakhloo, 2020) définissent la maturité numérique comme l'état d'avancement d'une organisation dans sa transformation numérique : intégration des technologies, nouvelles compétences, alignement, etc.

Enfin, la maturité numérique s'évalue selon plusieurs niveaux (Amaral et Peças, 2021; Borštnar et Pucihar, 2021; Teichert, 2019), plutôt que par un simple critère binaire. Les modèles de maturité peuvent être descriptifs, prescriptifs ou comparatifs (De Carolis et al., 2017; Ifenthaler et Egloffstein, 2020), et s'appuient sur l'examen de dimensions variées (technologies, processus, stratégie, culture, etc.) (Fletcher et Griffiths, 2020; Marks et Al-Ali, 2022; Lin et al., 2020). Ces modèles permettent d'identifier le niveau actuel de maturité, d'élaborer un plan d'actions et de comparer l'évolution de l'entreprise dans le temps (Colli et al., 2018; Robertson et al., 2022; Wagire et al., 2021).

4.3 Conclusion sur les résultats

Au final, le readiness se définit comme l'état ou le processus de préparation d'une organisation, tandis que la maturité renvoie à un cheminement évolutif vers un stade plus avancé. Les deux notions se chevauchent parfois, mais le readiness apparaît souvent comme un préalable (état ou capacité à entamer la transformation), alors que la maturité souligne l'avancement continu et l'intégration de nouvelles pratiques.

5 ANALYSE DES RESULTATS

5.1 Confusion et interchangeabilité

Sur l'ensemble des articles retenus (après élimination des doublons, N = 89), 24 évoquent simultanément la readiness et la maturité. Parmi ces 24 articles, seulement 9 (37,5%) proposent une distinction explicite ou des définitions différenciées. Parmi ces 9 articles, 3 établissent une clarification qui, paradoxalement, fusionne ces deux concepts, contribuant ainsi à la persistance de l'ambiguïté terminologique. En conséquence, 20,2 % du corpus analysé (N = 89), bien qu'il soit largement cité et jugé pertinent dans le domaine de la transformation numérique, ne dissipe pas cette confusion conceptuelle et participe à son maintien.

1ère source de confusion : utilisation interchangeable des concepts

Une série de modèles de maturité utilise le terme readiness dans leur titre ou inversement (ex. : Smart Industry Readiness Index (Hauser et Tan, 2017), IMPULS – Industrie 4.0 Readiness (Lichtblau et al., 2015), DREAMY – Digital Readiness Assessment Maturity Approach (De Carolis et al., 2017)). Ces dénominations emploient indifféremment « readiness » et « maturité » pour décrire l'intégration des technologies numériques, reflétant la pratique fréquente de substituer l'un à l'autre. Par exemple, De Carolis et al. (2017) décrivent leur outil comme un « maturity assessment method to measure digital readiness », mélangeant explicitement les deux concepts. Des formulations du type « One way to assess the readiness levels of specific technologies is maturity models » (Gürdür et al., 2019) ou « to implement smart manufacturing practices, it is necessary to establish organizational readiness based on its current maturity levels » (Dutta et al., 2020) illustrent ce recours systématique aux deux termes comme s'ils étaient synonymes. La confusion s'observe également dans la traduction des deux termes. Par exemple, le site du gouvernement fédéral du Canada présente un outil d'évaluation du niveau de maturité technologique (Gouvernement du Canada, 2021) qui devient en version anglaise le "*Technology Readiness Level Assessment Tool*" justifiant l'importance d'une distinction conceptuelle plus formelle pour appuyer la transformation numérique des organisations.

2ème source de confusion : accompagnements mal adaptés

Dans la pratique organisationnelle, les articles consultés montrent que certains diagnostics de maturité numériques débouchent sur des recommandations technologiques. Pourtant, des travaux rapportent un taux d'échec pouvant atteindre 70 % pour l'implantation d'outils numériques (Forth et al., 2020; Poba-Nzaou, 2008), principalement dû à un manque de readiness (Stentoft et al., 2021). Malgré ce constat, peu d'experts évaluent formellement la phase de readiness avant de suggérer l'adoption d'une solution. L'assimilation de la maturité avec le readiness conduit souvent à des plans d'action inappropriés pour les PME, lesquelles ne maîtrisent pas encore les prérequis indispensables à la transformation numérique (Rauch et al., 2019).

Ce flou conceptuel entre readiness et maturité numérique s'observe également sur le terrain, comme en témoigne une analyse de 15 entreprises manufacturières québécoises évaluées dans le cadre d'audits réalisés pour la thèse doctorale de Gamache (2019). Bien que leurs scores de maturité se situent majoritairement entre 1,7 et 2,7 sur une échelle de 4 (moyenne : 2,18), les recommandations formulées ciblaient souvent des projets associés à des stades avancés de transformation (ex. : ERP intégré, synchronisation des activités en temps réel, tableaux de bord dynamiques), alors que les fondations nécessaires à leur succès (standardisation, structuration de la donnée, coordination interne) n'étaient pas encore en place. Cette inadéquation illustre l'impact concret de la confusion conceptuelle : l'usage d'un audit de maturité dans un contexte de faible readiness génère des recommandations prématurées, augmentant le risque d'échec ou de gaspillage de ressources. Fait révélateur, 44,6 % des 74 projets identifiés portaient en réalité sur des actions préparatoires (ex. : planification, clarification des rôles, amélioration de la communication ou de la culture du changement), ce qui témoigne d'un besoin latent de readiness, masqué par l'approche méthodologique privilégiée. De plus, 73 % des entreprises (11 sur 15) se sont vues recommander au moins un projet de maturité numérique avancée malgré un niveau de préparation insuffisant. Ce constat suggère que l'absence d'une distinction claire entre readiness et maturité dans les outils d'évaluation conduit, en pratique, à des diagnostics erronés et à des choix d'accompagnement sous-optimaux.

5.2 Méthodes d'évaluation

La majorité des études abordant la maturité (19 articles) la considèrent selon une approche non binaire : l'organisation progresse d'un niveau initial (novice) à un niveau plus avancé (leader). En revanche, peu d'articles décrivent précisément la méthode de mesure du readiness (seulement 10). Parmi ceux-ci, quatre adoptent une évaluation non binaire (Jeong et Lee, 2015; Lassing et al., 2018; Lokuge et al., 2019; Arthur-Nyarko et al., 2020; Gfrerer et al., 2021; Caiado et al., 2021), trois proposent une approche binaire (prêt / pas prêt) (Hong et Kim, 2018; Pacchini et al., 2019; Charbonneau-Genest et Gamache, 2020) et certaines études (Lokuge et al., 2019; Gfrerer et al., 2021; Caiado et al., 2021) évoquent à la fois un processus graduel et un état final de readiness.

En pratique, cette diversité s'explique par la nature même des deux concepts. D'un côté, la maturité est généralement décrite comme un continuum de progression, mesuré par des niveaux clairement définis. De l'autre, le readiness apparaît tantôt comme un état binaire (une organisation est prête ou non), tantôt comme un processus progressif (l'organisation peut franchir plusieurs stades de préparation avant de se juger suffisamment prête). Dans certains cas, la readiness est évaluée en continu, puis validée sous forme binaire au moment où l'entreprise estime avoir satisfait certaines conditions.

Cette disparité souligne l'importance, pour toute évaluation du readiness, de clarifier si l'on envisage un modèle entièrement linéaire (non binaire) ou un point de bascule (binaire) au-delà duquel l'organisation passe concrètement à l'action. En revanche, pour la maturité, la littérature s'accorde sur une évolution à plusieurs niveaux, ce qui en fait un outil permettant de diagnostiquer un niveau d'avancement et d'orienter des stratégies d'amélioration.

5.3 Dimensions et facteurs d'influence

Après la sélection des articles, nous avons identifié, au fil de la lecture intégrale de chaque texte, toutes les variables ou

facteurs susceptibles de décrire ou d'influencer le readiness ou la maturité numérique. Pour limiter les doublons, nous avons regroupé les occurrences sémantiquement proches (ex. : « culture organisationnelle » ⇨ « culture »). Nous avons ensuite synthétisé ces dimensions dans un tableau (Tableau 2) où chaque ligne représente une dimension (ex. : budget, compétences, technologie), et chaque colonne correspond à un article particulier. La valeur de 1 dans une cellule indique que l'article traite explicitement de la dimension en question.

Cette mise en forme a permis de distinguer (1) les dimensions caractéristiques du readiness (généralement centrées sur la préparation, la psychologie du changement et le soutien en amont), (2) les dimensions davantage associées à la maturité (axées sur la progression, la pérennisation des pratiques et la mesure des niveaux d'avancement) et (3) un noyau commun (ex. culture, stratégie, compétences, technologie), présent tant dans les études dédiées au readiness que dans celles portant sur la maturité, et susceptible d'alimenter la confusion.

Les observations montrent d'une part des dimensions typiquement liées au readiness (ex. : aptitude, attitude envers le changement, préparation psychologique), et d'autre part des dimensions davantage associées à la maturité (ex. : gouvernance, vision, produits). Une série de facteurs comme

Tableau 2 : Dimensions citées dans la littérature

	Auteurs	Aptitude	Attitude envers le changement	Budget	Capacité	Client	Communications	Compétence	Compréhension commune	Compréhension	Connectivité	Considération	Création de valeur	Culture	Décision	Efficacité	Engagement	Environnement	Equipement	Expérience	Gens	Gouvernance	Implication	Leadership	Modèle d'affaires	Motivation	Objectifs	Opérations	Organisation	Partage d'information	Pédagogie	Prendre des risques	Processus	Produits	Psychologique	Stratégie	Structure	Support et attitude	Système d'information	Technologie	Vision
Readiness	Karimi et al (2009)							1																							1								
	Molla et Cooper (2010)	1					1		1				1		1	1						1																	
	Al-Awidi et Alchafe (2017)							1			1																												
	Hong et Kim (2018)						1	1							1																								
	Blayone et al. (2018)						1	1							1																								
	Kim et al. (2019)						1	1							1																								
	Gurdur et al (2019)												1							1							1									1			
	Lam et Law (2019)	1						1	1				1																										
	Lokuge et al. (2019)																																1						
	Handel et al. (2020)	1															1	1										1											
	Peled (2021)						1		1						1																								
	Singh et al. (2021)						1		1						1																								
	Stentoft et al. (2021)			1			1		1															1							1					1			
	Frick et al. (2021)																						1															
	Machado et al. (2021)		1										1										1															
	Van et al. (2021)	1		1																													1					
	Aditya (2021)																												1				1				1	
	Gfrere et al. (2021)		1														1																		1			
	Jun et al. (2022)																																1		1			
	Holmstrom (2022)																									1	1										1		
	Hussain et al. (2022)				1							1	1		1									1							1			1	1			
	Total	4	2	2	1	0	0	7	1	10	0	1	1	5	0	7	1	1	1	1	1	0	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	0	4	1	3	1	1	2	0
Maturité	Gottschalk (2009)																											1								1			
	Colli et al. (2018)										1		1									1						1								1			
	Ghobakhloo (2020)													1						1															1				
	Ifenthaler et Egloffstein (2020)													1						1												1				1			
	Lin et al. (2020)					1						1								1	1		1			1							1		1				
	Marks et al. (2020)					1		1																								1			1				1
	North et al. (2020)				1																			1				1				1							
	Fletcher et Griffiths (2020)					1									1					1																			
	Chen et Tian (2022)												1															1								1	1		
	Total	0	0	0	1	2	1	1	0	0	1	0	2	3	1	0	0	0	0	0	4	2	0	1	1	0	0	1	3	0	0	0	3	1	0	3	3	0	0	3	2

la culture ou la stratégie, ressort dans la majeure partie des articles, quel que soit le concept abordé, soulignant une base commune pouvant engendrer une confusion conceptuelle. Toutefois, le fait que certaines dimensions soient exclusivement ou principalement citées dans le cadre du readiness ou de la maturité confirme que ces deux notions conservent des spécificités et, donc, une utilité distincte.

5.4 Similarités et différences principales

Au niveau des similarités, le noyau commun (culture, stratégie, compétences, technologie) témoigne d'un chevauchement entre les deux concepts. Cette convergence peut expliquer pourquoi la littérature emploie parfois ces termes de manière interchangeable. Aussi, les deux concepts se développent dans le contexte de l'Industrie 4.0 et de la transformation numérique, gagnant tous deux en popularité autour de 2015-2016, s'inscrivant ainsi tous deux dans une dynamique de changement organisationnel déclenché par l'émergence de technologies numériques. Enfin, qu'il s'agisse de readiness ou de maturité, la majeure partie des études mentionne la possibilité de concevoir des plans d'action (feuilles de route, plans stratégiques) à partir du diagnostic ou de l'évaluation. Dans le readiness, ces actions ciblent principalement la préparation à la transformation ; dans la maturité, elles visent l'évolution continue vers un état plus avancé.

Au niveau des différences, l'objectif fondamental des concepts semble être distinct. Le readiness renvoie à l'état (ou processus) de préparation et de mobilisation préalable (assurer les prérequis humains, psychologiques, financiers), tandis que la maturité décrit la progression ou l'institutionnalisation de pratiques numériques (paliers successifs, degrés d'adoption). Aussi, dans la plupart des articles, la maturité s'évalue par un continuum de niveaux (non binaire), alors que le readiness se décline tantôt selon une approche binaire (prêt / pas prêt) tantôt sous forme de paliers. Cette divergence méthodologique signale des finalités différentes : la maturité numérique vise un diagnostic de l'état actuel et la planification de l'évolution, tandis que le readiness numérique consiste à vérifier si l'organisation peut amorcer (ou non) sa transformation numérique. Enfin, les résultats indiquent que certaines dimensions (ex : aptitude, attitude envers le changement, budget, engagement) sont beaucoup plus fréquentes dans le readiness, reflétant l'importance de la préparation psychologique et organisationnelle. À l'inverse, des facteurs comme gouvernance, vision stratégique, produits et connectivité, apparaissent surtout dans les travaux portant sur la maturité, soulignant un souci de consolidation de habiletés techniques et de déploiement à long terme.

De cette confrontation des similitudes et des divergences, on constate que le readiness numérique et la maturité numérique sont deux concepts complémentaires : le readiness balise la

faisabilité initiale d'une transformation, tandis que la maturité en mesure la progression. Cependant, des éléments communs renforcent l'impression d'un recouvrement partiel, source de confusion lorsque ces piliers communs ne sont pas clairement distingués selon l'intention du diagnostic.

5.5 Définitions proposées

Au vu des analyses réalisées et afin de clarifier l'emploi des deux concepts, nous proposons les définitions suivantes :

Readiness numérique : *Processus ou état décrivant la volonté et la capacité d'une organisation à amorcer une transformation numérique, incluant les ressources, la préparation psychologique, la coordination interne et l'acceptation du changement*.

Maturité numérique : *Évolution progressive et multi-niveaux d'une organisation dans son intégration des technologies numériques, se traduisant par la consolidation de pratiques, la montée en compétences et l'institutionnalisation d'approches numériques*.

Cette distinction s'appuie sur l'idée que le readiness précède logiquement la maturité : il fournit une évaluation de l'état de préparation en vue du déploiement de la transformation, tandis que la maturité représente un continuum de développement d'une organisation. Elle rappelle également la présence d'un socle commun de dimensions, mais insiste sur les différences de finalité et de méthodologie d'évaluation, rendant ces concepts non interchangeables.

6 DISCUSSION ET CONCLUSION

Cette étude a d'abord confirmé la confusion persistante entre readiness numérique et maturité numérique, ce qui satisfait le premier objectif de recherche. Sans distinction claire, les diagnostics et les recommandations fournis aux organisations risquent d'être inadaptés, contribuant potentiellement à un taux élevé d'échecs dans les projets de transformation numérique.

La seconde partie de l'objectif visait à clarifier les deux concepts. L'analyse comparative montre que, bien que complémentaires, elles diffèrent quant à leurs finalités et leurs méthodologies d'évaluation. Le readiness détermine l'état (ou le processus) de préparation (psychologique, financier, culturel), tandis que la maturité décrit la progression ou l'institutionnalisation des pratiques numériques. Trois apports majeurs ressortent :

Pertinence pour la recherche sur l'Industrie 4.0 :

En clarifiant deux concepts fréquemment employés de manière interchangeable, cette étude comble une lacune conceptuelle et participe à l'enrichissement d'un cadre de référence plus robuste pour l'analyse de la transformation numérique.

Apport méthodologique :

L'approche combinant (a) une revue de littérature extensive, (b) l'analyse des méthodes d'évaluation (binaire ou non binaire) et (c) les dimensions dans chacun des concepts (pour repérer les dimensions partagées ou spécifiques) pourraient inspirer d'autres travaux sur la maturité et le readiness numérique.

Renforcement du soutien stratégique

Une définition plus précise de ces concepts aiderait décideurs à mieux calibrer l'aide financière, le conseil ou la formation en fonction du niveau de readiness ou de maturité. Par exemple, pour une entreprise peu préparée, on mettra l'accent sur le développement psychologique, la planification budgétaire ou la culture du changement. Pour une entreprise jugée prête, la priorité sera donnée à une feuille de route technologique et à l'intégration de systèmes avancés. Les responsables de projets numériques et les cabinets-conseil pourraient s'appuyer sur ces résultats pour préciser leurs diagnostics et leurs interventions, diminuant le risque d'inadéquation entre les recommandations et le contexte réel de l'entreprise.

En définitive, la présente étude met en lumière la nécessité d'une distinction conceptuelle ferme entre readiness numérique et maturité numérique, montrant comment chacun s'inscrit dans une phase distincte du parcours de transformation numérique. Cela dit, quelques limites méritent d'être soulignées. D'abord, la recherche s'est appuyée sur des mots clés spécifiques, excluant possiblement certaines études dans d'autres langues ou moins accessibles. Ensuite, le regroupement sémantique des dimensions repose sur un jugement subjectif, pouvant conduire à des résultats différents avec d'autres méthodes. En termes de perspectives de recherche, il serait intéressant de développer et valider des outils de mesure spécifiquement dédiés au readiness et d'évaluer l'impact quantitatif d'une mauvaise identification du stade (readiness versus maturité) sur les taux de succès des projets. Analyser les trajectoires rapides de certaines entreprises, capables de passer du readiness à la maturité, permettrait aussi d'identifier les facteurs clés d'une transition fluide.

Dans l'ensemble, la clarification proposée dans cette recherche et la suggestion de nouveaux outils d'accompagnement pourraient contribuer à abaisser les barrières à l'entrée pour la transformation numérique, en fournissant aux organisations un meilleur référentiel pour évaluer leur niveau de préparation et orienter leurs décisions stratégiques. Par exemple, certaines dimensions du readiness identifiées dans cette étude (préparation psychologique, coordination interne, leadership numérique, clarté des objectifs, standardisation des processus, etc.) pourraient être intégrées à des outils d'autodiagnostic simples, orientés vers la décision. Un score de readiness combinant ces facteurs permettrait ainsi de recommander d'abord des actions préparatoires lorsque nécessaire, optimisant l'impact des projets et les chances de succès d'une transformation numérique.

7 REFERENCES

Aditya, D. S. (2021). Embarking Digital Learning Due to COVID-19: Are Teachers Ready? *Journal of Technology and Science Education, 11*(1), 104–116.

Al-Awidi, H. M., & Aldhafeeri, F. M. (2017). Teachers' readiness to implement digital curriculum in Kuwaiti schools. *Journal of Information Technology Education: Research, 16*, 105–125.

Amaral, A., & Peças, P. (2021). SMEs and Industry 4.0: Two case studies of digitalization for a smoother integration. *Computers in Industry, 125*, 103333.

Ariffin, K. A. Z., & Ahmad, F. H. (2021). Indicators for maturity and readiness for digital forensic investigation in era of industrial revolution 4.0. *Computers & Security, 105*, 102237.

Arthur-Nyarko, E., Agyei, D. D., & Armah, J. K. (2020). Digitizing distance learning materials: Measuring students' readiness and intended challenges. *Education and Information Technologies, 25*(4), 2987–3002.

Bauer, A., Hämmerle, M., Schlund, S., & Vocke, C. (2015). Transforming to a hyper-connected society and economy—Towards an "Industry 4.0." In *Procedia Manufacturing, 3* (pp. 417–424).

Bélanger et Gamache (2024). Unveiling the gap: The misalignment of digital transformation support tools for manufacturing SMEs. *IFAC-PapersOnLine, 58*(19), 905-910. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.09.166

Berghaus, S., & Back, A. (2016). Stages in digital business transformation: Results of an empirical maturity study. Communication présentée à la *Mediterranean Conference on Information Systems (MCIS)*.

Berman, S. J. (2012). Digital transformation: opportunities to create new business models. *Strategy & Leadership, 40*(2), 16–24.

Blayone, T. J., Mykhailenko, O., Kavtaradze, M., Kokhan, M.,

Vanoostveen, R., & Barber, W. (2018). Profiling the digital readiness of higher education students for transformative online learning in the post-soviet nations of Georgia and Ukraine. *International Journal of Educational Technology in Higher Education, 15*(1), 1–22.

Borštnar, M. K., & Pucihar, A. (2021). Multi-attribute assessment of digital maturity of SMEs. *Electronics, 10*(8), 8085.

Brozzi, R., Riedl, M., & Matta, D. (2021). Key readiness indicators to assess the digital level of manufacturing SMEs. *Procedia CIRP, 96*, 201–206.

Carey, B. J., & MacLachlan, G. F. (1977). Automated design based upon microprogrammable bit slice microprocessors. *Proceedings of the Symposium on Design Automation and Microprocessors,* 381–388.

Chamberland, S. (2020). *Changement au programme Audit 4.0 du MEI.* Récupéré sur Brome Conseil : https://bromeconseil.com/changements-programme-audit-industrie-4-0-janvier-2020/

Charbonneau-Genest, M., & Gamache, S. (2020). Prerequisites for the implementation of industry 4.0 in manufacturing SMEs. *Procedia Manufacturing, 51*, 1215–1220.

Charbonneau-Genest, M., & Gamache, S. (2023). The importance of digital readiness on manufacturing SMEs' performance aiming towards Industry 4.0: A case study. In *Lecture Notes in Mechanical Engineering* (pp. 1–10).

Chen, H., & Tian, Z. (2022). Environmental uncertainty, resource orchestration and digital transformation: A fuzzy-set QCA approach. *Journal of Business Research, 139*, 184–193.

Colli, M., Berger, U., Bockholt, M., Madsen, O., Møller, C., & Wæhrens, B. V. (2019). A maturity assessment approach for conceiving context-specific roadmaps in the Industry 4.0 era. *Annual Reviews in Control, 48*, 165–177.

Colli, M., Madsen, O., Berger, U., Møller, C., Wæhrens, B. V., & Bockholt, M. (2018). *Contextualizing the outcome of a maturity assessment for Industry 4.0*.

Danjou, C., Rivest, L., & Pellerin, R. (2017). *Industrie 4.0: Des pistes pour aborder l'ère du numérique et de la connectivité.* Centre facilitant la recherche et l'innovation dans les organisations (CEFRIO).

Dassisti, M., Giovannini, A., Merla, P., Chimienti, M., & Panetto, H. (2019). An approach to support Industry 4.0 adoption in SMEs using a core-metamodel. *Annual Reviews in Control, 47*, 266–274.

De Carolis, A., Macchi, M., Kulvatunyou, B., Brundage, M. P., & Terzi, S. (2017). Maturity models and tools for enabling smart manufacturing systems: comparison and reflections for future developments. In *Product Lifecycle Management and the Industry of the Future* (pp. 13–25). Springer.

Dörner, K., & Edelman, D. (2015). What 'digital' really means. *McKinsey & Company*. https://www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-digital/our-insights/what-digital-really-means

Duman, M. C., & Akdemir, B. (2021). A study to determine the effects of industry 4.0 technology components on organizational performance. *Technological Forecasting and Social Change, 167*, 120615.

Dutta, G., Kumar, R., Sindhwani, R., & Singh, R. K. (2020). Digital transformation priorities of India's discrete manufacturing SMEs–A conceptual study in perspective of Industry 4.0. *Competitiveness Review: An International Business Journal, 30*(3), 289–314.

Fareri, S., Fantoni, G., Chiarello, F., Coli, E., & Binda, A. (2020). Estimating Industry 4.0 impact on job profiles and skills using text mining. *Computers in Industry, 118*, 103222.

Fletcher, G., & Griffiths, M. (2020). Digital transformation during a lockdown. *International Journal of Information Management, 55*, 102185.

Forth, P., Reichert, T., de Laubier, R., & Chakraborty, S. (2020). *Flipping the odds of digital transformation success.* Boston Consulting Group. https://www.bcg.com/publications/2020/increasing-odds-of-success-in-digital-transformation

Frick, N. R., Mirbabaie, M., Stieglitz, S., & Salomon, J. (2021). Maneuvering through the stormy seas of digital transformation: the impact of empowering leadership on the AI readiness of enterprises. *Journal of Decision Systems, 30*(2–3), 235–258.

Gamache, S. (2019). *Stratégies de mise en oeuvre de l'industrie 4.0 dans les petites et moyennes entreprises manufacturières québécoises.* [Thèse de doctorat]. Université du Québec à Chicoutimi.

Gfrerer, A., Hutter, K., Füller, J., & Ströhle, T. (2021). Ready or not: Managers' and employees' different perceptions of digital readiness. *California Management Review, 63*(2), 23-48.

Ghobakhloo, M. (2020). Determinants of information and digital technology implementation for smart manufacturing. *International Journal of Production Research, 58*(8), 2384-2405.

Gong, C., & Ribiere, V. (2021). Developing a unified definition of digital transformation. *Technovation, 102*, 102217.

Gottschalk, P. (2009). Maturity levels for interoperability in digital government. *Government information quarterly, 26*(1), 75-81.

Gouvernement du Canada. (2021). *Outil d'évaluation du niveau de maturité technologique (NMT)*. Science et Innovation. https://ised-isde.canada.ca/site/carrefour-croissance-propre/fr/outil-deevaluation-niveau-maturite-technologique-nmt

Gurdur, D., El-Khoury, J., & Törngren, M. (2019). Digitalizing Swedish industry: What is next?: Data analytics readiness assessment of Swedish industry, according to survey results. *Computers in Industry, 105*, 153–163.

Händel, M., Stephan, M., Gläser-Zikuda, M., Kopp, B., Bedenlier, S., & Ziegler, A. (2020). Digital readiness and its effects on higher education students' socio-emotional perceptions in the context of the COVID-19 pandemic. *Journal of Research on Technology in Education, 54*(2), 267-280.

Hébert, P. (2016). *Feuille de route industrie 4.0 – Plan d'action en économie numérique.* Gouvernement du Québec.

Holmström, J. (2022). From AI to digital transformation: The AI readiness framework. *Business Horizons, 65*(3), 329–339.

Hong, A. J., & Kim, H. J. (2018). College students' digital readiness for academic engagement (DRAE) scale: Scale development and validation. *The Asia-Pacific Education Researcher, 27*(4), 303–312.

Hussain, M., & Papastathopoulos, A. (2022). Organizational readiness for digital financial innovation and financial resilience. *International Journal of Production Economics, 243*, 108326.

Ifenthaler, D., & Egloffstein, M. (2020). Development and Implementation of a Maturity Model of Digital Transformation. *TechTrends, 64*(2), 302-309. doi:10.1007/s11528-019-00457-4

Investissement Québec. (2020). *Audit industrie 4.0: réussir la transformation de votre entreprise.* Ministère de l'Innovation. https://www.economie.gouv.qc.ca/fr/bibliotheques/programmes/aide-financiere/programme-audit-industrie-40/

Issa, A., Hatiboglu, B., Bildstein, A., & Bauernhansl, T. (2018). Industrie 4.0 roadmap: Framework for digital transformation based on the concepts of capability maturity and alignment. *Procedia Cirp, 72*, 973-978.

Jeong, S., & Lee, S. (2015). What drives technology convergence? Exploring the influence of technological and resource allocation contexts. *Journal of Engineering and Technology Management, 36*, 78–96.

Jesus, C. d., & Lima, R. M. (2020). Literature search of key factors for the development of generic and specific maturity models for Industry 4.0. *Applied Sciences, 10*(17), 5825.

Jones, M. D., Hutcheson, S., & Camba, J. D. (2021). Past, present, and future barriers to digital transformation in manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Systems, 60*, 936–948.

Jun, W., Nasir, M. H., Yousaf, Z., Khattak, A., Yasir, M., Javed, A., & Shirazi, S. H. (2021). Innovation performance in digital economy: does digital platform capability, improvisation capability and organizational readiness really matter? *European Journal of Innovation Management, 25*(5), 1309-1327.

Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. *Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0*.

Karimi, J., Somers, T. M., & Bhattacherjee, A. (2009). The role of ERP implementation in enabling digital options: A theoretical and empirical analysis. *International Journal of Electronic Commerce, 13*(3), 7-42.

Kane, G. (2019). The technology fallacy: people are the real key to digital transformation. *Research-Technology Management, 62*(6), 44–49.

Kim, H. J., Hong, A. J., & Song, H.-D. (2019). The roles of academic engagement and digital readiness in students' achievements in university e-learning environments. International *Journal of Educational Technology in Higher Education*, 16(1), 1-18.

Lam, C., & Law, R. (2019). Readiness of upscale and luxury-branded hotels for digital transformation. *International Journal of Hospitality Management, 79*, 60-69.

Larjovuori, R.-L., Bordi, L., Mäkiniemi, J.-P., & Heikkilä-Tammi, K.

(2016). The role of leadership and employee well-being in organizational digitalization. Dans T. Russo-Spena & C. Mele (dir.), *Proceedings of ItAIS 2016* (p. 1159).

Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, *6*(4), 239–242.

Li, G., Hou, Y., & Wu, A. (2017). Fourth Industrial Revolution: technological drivers, impacts and coping methods. *Chinese Geographical Science*, *27*(4), 626–637.

Lichtblau, Stich, V., Bertenrath, R., Blum, M., Bleider, M., Millack, A., . . . Schröter, M. (2015). IMPULS-industrie 4.0-readiness. *Impuls-Stiftung des VDMA, Aachen-Köln*.

Lin, T. C., Sheng, M. L., & Jeng Wang, K. (2020). Dynamic capabilities for smart manufacturing transformation by manufacturing enterprises. *Asian Journal of Technology Innovation*, *28*(3), 403-426. doi:10.1080/19761597.2020.1769486

Lokuge, S., Sedera, D., Grover, V., & Dongming, X. (2019). Organizational readiness for digital innovation: Development and empirical calibration of a construct. *Information & Management*, *56*(3), 445–461.

Machado, Winroth, M., Almström, P., Ericson Öberg, A., Kurdve, M., & AlMashalah, S. (2021). Digital organisational readiness: experiences from manufacturing companies. *Journal of Manufacturing Technology Management*, *32*(9), 167-182.

Machado, C. G., Winroth, M., Carlsson, D., Almström, P., Centerholt, V., & Hallin, M. (2019). Industry 4.0 readiness in manufacturing companies: Challenges and enablers towards increased digitalization. *Procedia CIRP*, *81*, 1113–1118.

Mahmood, F., Khan, A. Z., & Khan, M. B. (2019). Digital organizational transformation issues, challenges and impact: A systematic literature review of a decade. *Abasyn University Journal of Social Sciences*, *12*(2).

Marks, A., & Al-Ali, M. (2022). Digital Transformation in Higher Education: A Framework for Maturity Assessment. In *COVID-19 Challenges to University Information Technology Governance* (pp. 61-81).

Matt, C., Hess, T., & Benlian, A. (2015). Digital transformation strategies. *Business & Information Systems Engineering*, *57*(5), 339–343.

Ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie. (2023). *Transformation numérique*. https://www.economie.gouv.qc.ca/objectifs/ameliorer/transformation-numerique (Accessed 10 Febuary 2024).

Moeuf, A., Pellerin, R., Lamouri, S., Tamayo-Giraldo, S., & Barbaray, R. (2018). The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, *56*(3), 1118–1136.

Molla, A., & Cooper, V. (2010). Green IT readiness: A framework and preliminary proof of concept. *Australasian journal of information systems*, *16*(2).

Morakanyane, R., Grace, A. A., & O'Reilly, P. (2017). Conceptualizing digital transformation in business organizations: A systematic review of literature. Communication présentée à la *30th Bled eConference: Digital transformation–From connecting things to transforming our lives*.

Mosterman, P. J., & Zander, J. (2016). Industry 4.0 as a cyber-physical system study. *Software & Systems Modeling*, *15*(1), 17–29.

North, K., Aramburu, N., & Lorenzo, O. J. (2020). Promoting digitally enabled growth in SMEs: a framework proposal. *Journal of Enterprise Information Management*, *33*(1), 238-262. doi:10.1108/JEIM-04-2019-0103

Pacchini, A. P. T., Lucato, W. C., Facchini, F., & Mummolo, G. (2019). The degree of readiness for the implementation of Industry 4.0. *Computers in Industry*, *113*, 103125.

Parasuraman, A., & Colby, C. L. (2015). An updated and streamlined technology readiness index: TRI 2.0. *Journal of Service Research*, *18*(1), 59–74.

Peled, Y. (2021). Pre-service teacher's self-perception of digital literacy: The case of Israel. *Education and Information Technologies*, *26*(3), 2879-2896.

Poba-Nzaou, P. (2008). *Processus d'adoption et réduction du risque d'implantation des PGI dans les PME: une étude de cas multiples.* [Thèse de doctorat]. Université du Québec à Trois-Rivières.

Posada, J., Toro, C., Barandiaran, I., Oyarzun, D., Stricker, D., De Amicis, R., … Vallarino, I. (2015). Visual computing as a key enabling technology for industrie 4.0 and industrial internet. *IEEE Computer Graphics and Applications*, *35*(2), 26–40.

PwC Survey. (2016). *Industry 4.0: building the digital enterprise, global industry 4.0 survey*. http://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf

Qin, J., Liu, Y., & Grosvenor, R. (2016). A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and beyond. *Procedia CIRP*, *52*, 173–178.

Rauch, E., Dallasega, P., & Unterhofer, M. (2019). Requirements and Barriers for Introducing Smart Manufacturing in Small and Medium-Sized Enterprises. *IEEE Engineering Management Review*, *47*(3), 87–94.

Reis, J., Amorim, M., Melão, N., & Matos, P. (2018). Digital transformation: a literature review and guidelines for future research. In A. S. Rocha et al. (Eds.), *Trends and Advances in Information Systems and Technologies: Volume 6* (pp. 411–421). Springer.

Roblek, V., Meško, M., & Krapež, A. (2016). A complex view of industry 4.0. *Sage Open*, *6*(2), 2158244016653987.

Rodríguez-Abitia, G., & Bribiesca-Correa, G. (2021). Assessing digital transformation in universities. *Future Internet*, *13*(2), 36.

Schumacher, A., Erol, S., & Sihn, W. (2016). A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises. *Procedia CIRP*, *52*, 161–166.

Shahi, C., & Sinha, M. (2021). Digital transformation: challenges faced by organizations and their potential solutions. *International Journal of Innovation Science*, *13*(1), 17–33.

Singh, R., & Bhanot, N. (2019). An integrated DEMATEL-MMDE-ISM based approach for analysing the barriers of IoT implementation in the manufacturing industry. *International Journal of Production Research*, 57(14), 4285–4302.

Singh, R., Sharma, M., & Dhir, S. (2021). Modeling the effects of digital transformation in Indian manufacturing industry. *Technology in Society*, *67*, 101763.

Skog, D. A., Wimelius, H., & Sandberg, J. (2018). Digital disruption. *Business & Information Systems Engineering*, *60*(5), 431–437.

Stentoft, J., Adsbøll Wickstrøm, K., Philipsen, K., & Haug, A. (2021). Drivers and barriers for Industry 4.0 readiness and practice: empirical evidence from small and medium-sized manufacturers. *Production Planning & Control*, *32*(10), 811-828.

STIQ. (2020). *Baromètre industriel québécois: un portrait unique du secteur manufacturier*. https://www.stiq.com/wp-content/uploads/2016/03/STIQ-Barom%C3%A8tre-11e-%C3%A9dition-web.pdf

STIQ. (2023). *Baromètre industriel québécois: un portrait unique du secteur manufacturier*. https://www.stiq.com/wp-content/uploads/2023/05/STIQ-Barome%CC%80tre-2022-FINAL-WEB.pdf

STIQ. (2024). *Baromètre industriel québécois: un portrait unique du secteur manufacturier*. https://stiq.com/wp-content/uploads/2024/05/STIQ-Barometre-15e-Version-Web.pdf

Teichert, R. (2019). Digital transformation maturity: A systematic review of literature. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, *67*(6), 1673–1687.

Tortorella, G., & Fettermann, D. (2018). Implementation of industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies. *International Journal of Production Research*, *56*(8), 2975–2987.

Van, N. T., Abbas, A. F., Abuhassna, H., Awae, F., & Dike, D. (2021). Digital Readiness for Social Educators in Health Care and Online Learning During COVID-19 Pandemic: A Bibliometric Analysis. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, *15*(18).

Vial, G. (2021). Understanding digital transformation: A review and a research agenda. In *Managing Digital Transformation* (pp. 13–66). Springer.

Wang, J., Zhang, W., Shi, Y., Duan, S., & Liu, J. (2018). Industrial big data analytics: challenges, methodologies, and applications. *arXiv preprint arXiv:1807.01016*.

Wessel, L., Baiyere, A., Ologeanu-Taddei, R., Cha, J., & Blegind-Jensen, T. (2021). Unpacking the difference between digital transformation and IT-enabled organizational transformation. *Journal of the Association for Information Systems*, *22*(1), 102–129.

Zhang, J., Chen, K., Chen, C., & Chong, A. Y. L. (2021). Industry 4.0 and Its Implementation: A Review. *Information Systems Frontiers*, 1–11.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Renforcement de l'engagement dans l'Industrie 5.0

ALEXANDRE GOUJON[1], FRÉDÉRIC ROSIN[2], FLORIAN MAGNANI[3],
SAMIR LAMOURI[1], ROBERT PELLERIN[4]

[1] LAMIH, Arts et Métiers Sciences et Technologies
151 Bd de l'Hôpital, Paris, France
alexandre.goujon@ensam.eu ; samir.lamouri@ensam.eu

[2] LISPEN, Arts et Métiers Sciences et Technologies
2 Cours des Arts et Métiers, Aix-en-Provence, France
frederic.rosin@ensam.eu

[3] MAGELLAN, Université Jean Moulin Lyon 3, iaelyon School of Management
1C avenue des Frères Lumière, Lyon, France
florian.magnani@univ-lyon3.fr

[4] POLYTECHNIQUE MONTRÉAL et CIRRELT
2900 Boulevard Édouard-Montpetit, Montréal, Canada
robert.pellerin@polymtl.ca

***Résumé* – Cet article explore l'impact des nouvelles technologies sur l'engagement des employés dans le cadre de l'Industrie 5.0 (I5.0). Bien que l'Industrie 4.0 (I4.0) ait été introduite en 2011, la plupart des entreprises en sont encore aux premiers stades de la transition. L'I5.0 vise à intégrer davantage les priorités sociales et environnementales, en favorisant une collaboration harmonieuse entre humains et machines. L'autonomie, un pilier crucial de l'I5.0, est étroitement liée à l'engagement des employés. La revue systématique des travaux sur l'I4.0 et l'I5.0 a permis d'identifier 12 articles pertinents. Ces études mettent en évidence l'importance de l'engagement dans l'adoption des nouvelles technologies, bien que les méthodologies et les définitions de l'engagement varient considérablement. Les technologies d'intelligence artificielle, de simulation et de cobotique sont les plus étudiées. La majorité des études suggèrent que ces technologies renforcent l'engagement, mais certaines soulignent également des risques de dégradation. Un modèle d'engagement global, comme Octalysis, est proposé pour mieux comprendre les leviers de l'engagement. Les résultats soulignent la nécessité de méthodologies standardisées et d'une définition commune de l'engagement pour des recherches futures plus robustes.**

***Abstract* – This article explores the impact of new technologies on employee engagement in the context of Industry 5.0 (I5.0). Although Industry 4.0 (I4.0) was introduced in 2011, most companies are still in the early stages of the transition. I5.0 aims to further integrate social and environmental priorities, promoting harmonious collaboration between humans and machines. Autonomy, a crucial pillar of I5.0, is closely linked to employee engagement. A systematic review of the literature on I4.0 and I5.0 identified 12 relevant articles. These studies highlight the importance of engagement in the adoption of new technologies, although methodologies and definitions of engagement vary considerably. The most studied technologies are artificial intelligence, simulation, and cobotics. The majority of studies suggest that these technologies enhance engagement, but some also highlight risks of degradation. A global engagement model, such as Octalysis, is proposed to better understand the levers of engagement. The results emphasize the need for standardized methodologies and a common definition of engagement for more robust future research.**

***Mots clés* – industrie 5.0, industrie 4.0, engagement, motivation.**
***Keywords* – industry 5.0, industry 4.0, commitment, motivation.**

1 INTRODUCTION

Bien que le concept d'Industrie 4.0 (I4.0) ait émergé lors de la Foire de Hanovre en 2011, il semble que les entreprises soient encore loin de la transition vers cette nouvelle ère industrielle. Selon les études d'Acatech (Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation of Companies, s. d.), l'I4.0 Maturity Center estime même que la plupart des entreprises qui ont entamé la transition en sont encore aux premiers stades : en 2020, seuls 4% des entreprises auraient atteint le troisième des six grands stades de maturité identifiés pour cette transition. Le temps est venu pour les entreprises de tendre vers les stades de maturité supérieure, en particulier celui de l'adaptabilité.

Ce stade d'adaptabilité s'intègre dans un processus d'autonomisation, Schuh et al. (2020) définissant ce dernier stade de maturité comme la capacité d'un système homme-machine à prendre une décision de manière autonome. Dans ce processus d'autonomisation, l'engagement apparait comme une dimension forte d'une transformation réussie vers des stades de maturité plus avancée de l'I4.0. Cet engagement

ouvre une perspective d'intégration des dimensions plus humaines et sociales, chères à l'Industrie 5.0.

Définie par la Commission européenne (European Commission. Directorate General for Research and Innovation., 2021), ce concept d'Industrie 5.0 (I5.0) vient compléter l'approche de l'I4.0 en réorientant les innovations technologiques vers des priorités sociales et environnementales. Plusieurs organisations de recherche, agences de financement et institutions technologiques reconnaissent désormais la nécessité de dépasser une approche centrée sur des technologies isolées pour adopter une vision systémique où l'homme et la machine coévoluent.

Alors que l'I4.0 met l'accent sur l'intégration des technologies numériques dans la production et les chaînes d'approvisionnement, l'I5.0 cherche à approfondir cette transformation en favorisant une collaboration plus harmonieuse et efficace entre les humains, les machines et les systèmes numériques. Cette intégration doit associer la rapidité et la précision de l'automatisation industrielle à la créativité, à l'innovation et à l'esprit critique des humains.

Le processus d'autonomisation des systèmes technologiques, reconnue comme l'ultime étape de la transition vers l'I4.0, prend alors une nouvelle dimension : celle de l'autonomie du travailleur et par extension de son engagement. En effet, en permettant aux individus de prendre des initiatives et de se sentir davantage acteurs de leurs propres actions, l'autonomie constitue un puissant levier d'engagement (Chou, 2015). De plus, l'autonomie est identifié comme un besoin inné et universel pour susciter l'engagement des individus (Deci & Ryan, 2008). C'est enfin parce que l'engagement des employés est directement corrélé à la performance individuelle et organisationnelle (Sun & Bunchapattanasakda, 2019) qu'il devient essentiel dans le déploiement, l'acceptation et la pérennisation des nouvelles technologies.

Bien que certains chercheurs proposent des analyses approfondies d'un groupe particulier de technologies sur les facteurs humains, les recherches sur ce sujet restent rares et essentiellement exploratoires (Goujon et al., 2024). Zheng et al. (2019) ont préconisé de développer une compréhension exhaustive de l'utilisation combinée des nouvelles technologies et de leurs avantages. Certaines études cherchent à atteindre cet objectif en fournissant des feuilles de route ou des cadres pour le déploiement de l'I4.0 ou de l'I5.0, y compris des analyses des besoins industriels (Aital et al., 2022), des évaluations des forces et des obstacles (Zheng et al., 2019), ou une vision détaillée des tendances de publication (Nair et al., 2024). Enfin, d'autres études se concentrent directement sur les facteurs humains, en abordant des sujets tels que l'autonomie décisionnelle (Garofalo & Puangseree, 2023), la collaboration homme-machine (Geng & Varshney, 2022), la formation des employés (Santana & de Deus Lopes, 2020) et l'éthique (Paes et al., 2023).

Cependant, aucune de ces études ne fournit de résultats complets et généralisables ni ne recommande une méthodologie de recherche spécifique pour examiner l'impact des nouvelles technologies sur l'engagement des employés. La présente étude vise à combler cette lacune en caractérisant les travaux de recherche qui analysent l'impact des nouvelles technologies sur l'engagement des employés. Pour y arriver, nous avons réalisé une revue de la littérature des travaux traitant du lien entre les nouvelles technologies et l'engagement des employés.

La suite de ce document est organisée comme suit : la section 2 décrit la méthodologie utilisée pour cette revue systématique ; la section 3 détaille les résultats, que ce soient les résultats directs de la requête ainsi que l'analyse qui répond à la question de recherche ; la section 4 discute de ces résultats sous le prisme d'un modèle d'engagement ; enfin, la section 5 conclut l'étude en suggérant des orientations pour la recherche future.

2 MÉTHODOLOGIE

Une revue de la littérature a permis de recueillir les articles pertinents via la base de données Scopus, avec des recherches menées jusqu'au 14 février 2025. Lorsque les articles n'étaient pas disponibles, nous avons contacté les auteurs directement.

La requête utilisée est la suivante :

> *("industr* 5.0")*
> *AND*
> *("commitment" OR "engagement" OR "involvement" OR "motivation" OR "adherence")*

Le premier segment fait uniquement référence à l'Industrie 5.0 car le terme est à présent largement utilisé et nous souhaitions nous concentrer sur les articles clairement identifiés par leurs auteurs comme s'intégrant dans cette démarche ; le second contient un ensemble de termes liés ou synonymes de l'engagement. Ce second segment est difficile à définir en raison de l'utilisation large de ces termes. Nombre d'articles traitent de l'engagement dans l'acceptation des nouvelles technologies ou dans la transition vers l'I5.0, mais pas directement de l'impact de ces technologies sur l'engagement. Un filtre manuel a donc été nécessaire pour supprimer les nombreux faux positifs.

Deux évaluateurs indépendants ont procédé au filtrage des titres et des résumés, au filtrage du texte intégral et à l'extraction des données. Les résultats ont été comparés et les divergences ont été résolues en collaboration. En l'absence de consensus, un troisième évaluateur a été consulté pour prendre la décision finale. Les données suivantes ont été extraites de chaque article :

- *Références* : Titre, auteurs, date de publication et revue.
- *Objectif* : Résumé de l'objectif principal de l'article.
- *Méthodologie* : Quelle est la méthodologie de recherche utilisée ?
- *Technologies* : De quelles technologies est-il question ?
- *Engagement* : Comment les auteurs ont-ils caractérisé l'engagement ?
- *Démonstration* : L'impact des nouvelles technologies sur l'engagement a-t-il été démontré de manière concrète ou s'agit-il d'une analyse plus conceptuelle ?
- *Impact* : Cet impact sur l'engagement est-il un renfort ou une dégradation ?
- *Leviers* : Quels sont les leviers d'engagement impactés ?

Les données « Références » et « Objectif » ne sont utilisées que pour mémoriser et reconnaître le contenu des articles au fur et à mesure de leur traitement. Elles permettent de resituer l'article étudié, mais ne fournissent pas de réponses à la question de recherche. Les données « Méthodologie », « Engagement » et « Démonstration » permettent d'établir les principales méthodes de recherche utilisées pour étudier l'impact des nouvelles technologies sur l'engagement des employés. Les données « Technologie » et « Impact » nous permettent de construire une matrice de couverture de ces recherches en fonction des technologies étudiées. Enfin, la

donnée « Leviers », contextualisée par les autres données extraites, alimente la section discussion.

3 RÉSULTATS

3.1 Résultat de la requête

La requête a permis d'identifier un total de 184 documents. Après un premier filtre sur les titres et les résumés et un second sur les textes intégraux, 12 articles ont été sélectionnés pour l'extraction des données. La figure 1 présente l'organigramme détaillant la manière dont nous avons obtenu la liste des articles retenus.

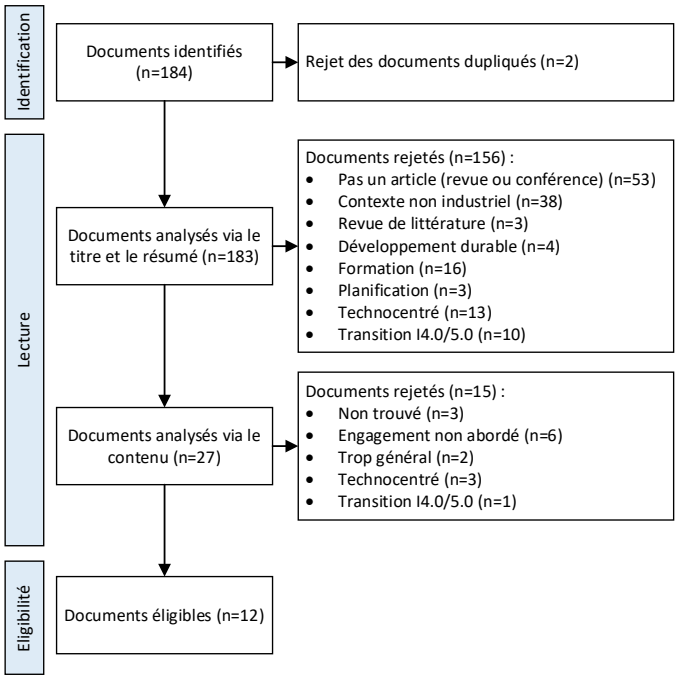


Figure 1. Organigramme de sélection des articles.

Notre requête n'a volontairement pas été restreinte à l'engagement de l'employé. Les résultats ont révélé que certains termes du second segment étaient parfois utilisés pour signifier un « recours à » une technologie ou une méthodologie. Par ailleurs, l'engagement et la motivation constituent des thèmes d'introduction ou de conclusion prometteurs lorsqu'il s'agit de travailler sur l'I5.0. Ils justifient de nombreux contextes et opportunités de recherche, alors même qu'ils ne sont pas abordés plus en détail dans les articles. Enfin, il est également souvent question de l'engagement des employés non pas dans leur travail augmenté de nouvelles technologies, mais plutôt dans la transition vers l'I5.0. Ce processus de sélection nous a permis d'identifier et d'exclure les articles qui ne correspondaient pas à notre objectif.

3.2 Analyse des articles

Les 12 articles retenus pour l'analyse sont présentés dans le tableau 1.

Près de la moitié de ces articles présente un contexte expérimental, que ce soit une expérience réalisée en laboratoire (comme une usine-lab) ou en entreprise par le déploiement d'une technologie sous forme de prototype. L'autre moitié propose des analyses plus conceptuelles sous la forme de revues de littérature et d'études de cas (figure 2). Par ailleurs, lorsqu'il est question d'engagement, quatre groupes technologiques ressortent : l'Intelligence Artificielle (IA), les systèmes de simulation (notamment les systèmes de communication, de suivi et de centralisation des données), la cobotique et la réalité augmentée/virtuelle (Figure 3).

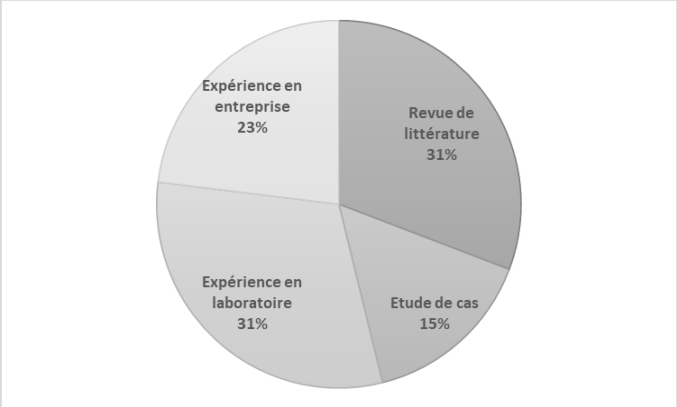


Figure 2. Utilisation des méthodologies de recherche pour étudier l'impact des nouvelles technologies sur l'engagement des employés.

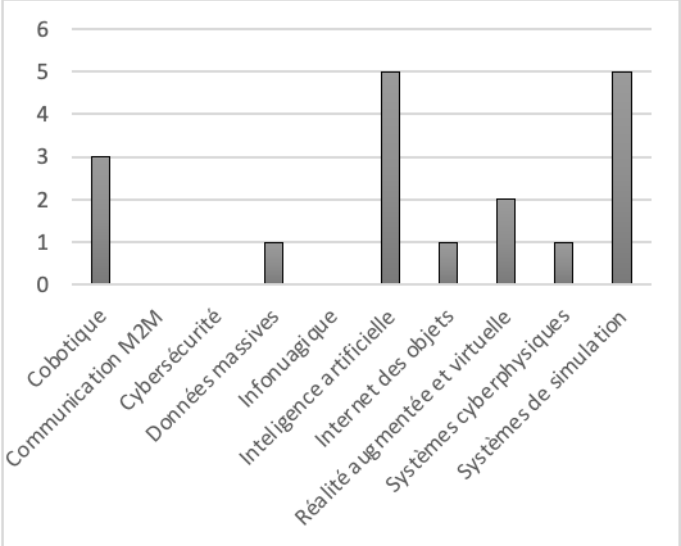


Figure 3. Nombre d'études portant sur l'impact de chacun des principaux groupes technologiques sur l'engagement des employés.

Dans ces articles, la mesure de l'engagement apparaît délicate. Si le recours à un questionnaire est fréquent, la mise en place d'un protocole de mesure physiologique reste exceptionnelle (deux des trois articles qui emploient cette méthode sont produits par la même équipe de recherche (Couture et al., 2024; Passalacqua et al., 2024a)). La majorité des articles présentent des résultats simplement induits (Figure 4) ; ces auteurs se basent sur une définition particulière de l'engagement et valident indirectement un impact à partir des données qu'ils ont pu mesurer. Ils justifient par exemple le renfort de l'engagement par l'augmentation du bien-être et la réduction des sources de stress (Psarommatis et al., 2023), ou encore par la réduction de la fatigue cognitive et l'augmentation de la confiance (Hoenig et al., 2024). Si les conditions de l'engagement sont renforcées, ils en déduisent que l'engagement sera renforcé, ce qui peut être discutable.

Les auteurs qui présentent des mesures plus concrètes ont recours à des questionnaires comme le User Engagement Scale (Nenna et al., 2024) ou encore l'échelle de Schaufeli et al. (2002) (Buisine et al., 2024). Quant aux auteurs qui pratiquent des mesures physiologiques, leurs travaux débutent par une

présentation des recherches antérieures en psychologie du travail et les résultats sont immanquablement combinés avec des mesures auto-déclaratives via des questionnaires. A deux exceptions près, les articles présentant des contextes expérimentaux sont associés à des résultats concrets là où les recherches plus conceptuelles mènent à un impact sur l'engagement induit.

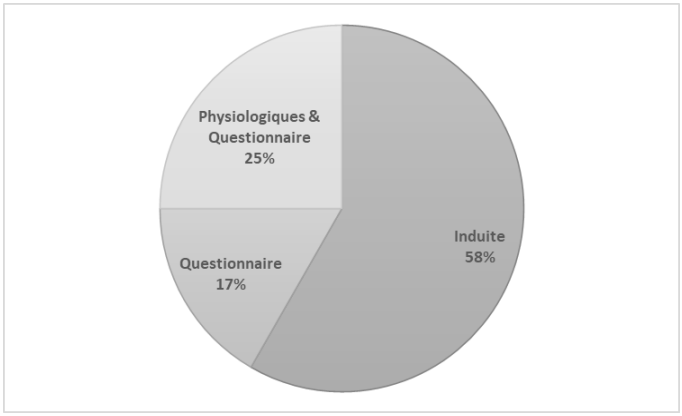


Figure 4. Mesure de l'engagement dans les études sur l'impact des nouvelles technologies sur l'engagement des employés.

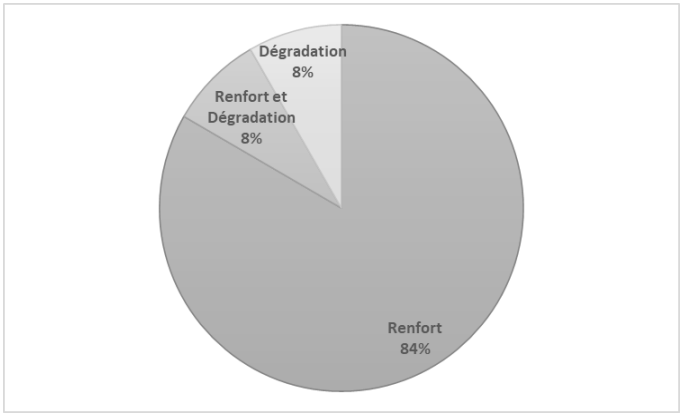


Figure 5. Impact des nouvelles technologies sur l'engagement selon le corpus d'articles retenus.

Par ailleurs, presque tous les articles retenus s'accordent à dire que les technologies étudiées renforcent l'engagement des employés (Figure 5). Mais comme la moitié de ces résultats sont induits, cette affirmation présente une certaine limite. Ainsi, ce sont plutôt certaines conditions de l'émergence de l'engagement qui semblent être renforcées par ces nouvelles technologies. Très peu d'auteurs nuancent cette perspective en suggérant que la technologie pourrait, au contraire, altérer cet engagement. Cette altération semble exclusivement discutée par des auteurs qui proposent une mesure physiologique (Passalacqua et al., 2024a). Passalacqua et al. (2024b) constatent même une déconnexion entre les études empiriques et théoriques et un manque d'harmonisation sur la manière d'évaluer l'impact des technologies sur l'engagement.

Enfin, il existe de fortes divergences quant à la caractérisation de l'engagement proposée par chaque auteur. Certains auteurs se basent sur des travaux antérieurs là où d'autres proposent leur propre caractérisation plus ou moins soutenue par la littérature. La définition du terme s'avère plutôt partagée : une attitude positive envers le travail, conduisant à une implication accrue des travailleurs dans leurs tâches (Salvadorinho et al., 2024). Cependant, les conditions d'émergence diffèrent fortement. Pour Buisine et al. (2024), l'engagement est lié au concept d'Ikigai adapté au monde du travail, illustrant les conditions d'émergence telles que la motivation intrinsèque, le sens du travail, le bien-être et la satisfaction des besoins psychologiques. Nenna et al. (2024) s'appuient sur quatre prérequis à l'engagement (attention, confort, appréciation et satisfaction) proposées par O'Brien et al. (2018). Dans certains cas, l'engagement est présenté comme un état multidimensionnel s'appuyant sur les travaux de Schaufeli et al. (2006) et de la théorie de l'autodétermination (Deci & Ryan, 2008). Il se caractérise comme un sentiment d'énergie et de résilience face aux défis professionnels, un sentiment d'accomplissement dans le travail et une immersion totale dans l'activité (Couture et al., 2024; Passalacqua et al., 2024a). D'autres auteurs ne font appel à aucun cadre théorique. Certains identifient trois dimensions à l'engagement : les dimensions cognitive, émotionnelle et comportementale (Psarommatis et al., 2023; Salvadorinho et al., 2024). L'engagement est parfois simplement défini par ses conséquences, c'est à dire la maîtrise de la concentration, de la charge cognitive ou du niveau de stress (Granata et al., 2024; Hoenig et al., 2024). Enfin, certains auteurs adoptent une approche plus pragmatique de l'engagement, en le définissant soit comme le degré d'implication dans l'exécution des tâches (Margherita & Braccini, 2022), soit en évitant de le caractériser explicitement (Bajic et al., 2024; Manurung et al., 2024).

Quoiqu'il en soi, ces caractérisations s'attardent principalement sur la définition de l'engagement et de ses conditions d'émergence, et moins sur les leviers d'engagement.

Tableau 1. Détails des articles retenus pour l'analyse

Référence	Objectif
(Bajic et al., 2024)	Proposer une méthodologie holistique pour l'implémentation d'un système humain-cyberphysique
(Manurung et al., 2024)	Analyser les stratégies de leadership dans l'I5.0 pour gérer la diversité des ressources humaines et l'évolution technologique.
(Couture et al., 2024)	Proposer un système adaptatif de feedback sur l'engagement des opérateurs.
(Hoenig et al., 2024)	Examiner l'intégration de l'IA Explicable dans les systèmes cyberphysiques.
(Passalacqua et al., 2024a)	Analyser l'impact d'un système d'IA sur la motivation, l'engagement et l'acquisition de compétences des travailleurs.
(Margherita & Braccini, 2022)	Explorer comment les nouvelles technologies soutiennent l'engagement des travailleurs dans les pratiques de Total Quality Management.
(Buisine et al., 2024)	Proposer une approche modélisée de l'ergonomie prospective en intégrant l'Ikigai.
(Passalacqua et al., 2024)	Caractériser les facteurs humains et psychosociaux dans les systèmes de travail basés sur l'IA.
(Nenna et al., 2024)	Détecter les états cognitifs et comportementaux des opérateurs travaillant avec des cobots.
(Granata et al., 2024)	Proposer une méthode d'allocation dynamique des tâches basée sur des données physiologiques et de performance.
(Psarommatis et al., 2023)	Examiner le rôle critique des facteurs humains dans la mise en œuvre du Zero Defect Manufacturing dans l'I5.0.
(Salvadorinho et al., 2024)	Explorer l'impact des systèmes de suggestion participatifs sur l'engagement des employés.

4 DISCUSSION

La majorité des études précédentes ayant défini l'engagement selon des approches variées, il devient difficile de comparer leurs résultats. Ainsi, le renfort défendu par les uns n'est peut-être pas aussi avéré selon la caractérisation de l'engagement des autres. Par ailleurs, ces caractérisations s'attachent principalement à définir ce que sont l'engagement et ses conditions d'émergence, et moins à comprendre les leviers qui font qu'un individu s'engage dans son travail. Voila pourquoi plusieurs articles prônent un renfort de l'engagement parce que les conditions d'émergence sont favorables ou parce qu'au contraire les conditions qui nuisent à son émergence sont diminuées. Mais de telles conditions ne sont probablement pas suffisantes pour s'assurer d'un engagement avéré de la part des employés.

Il est également intéressant de noter que les auteurs qui émettent des doutes sur une éventuelle dégradation de l'engagement par les nouvelles technologies soient également ceux qui proposent un protocole de collecte de données des plus complets. Le renfort de l'engagement ne peut pas être seulement induit par des résultats connexes, même prometteurs. Il apparait donc nécessaire de s'accorder sur un modèle d'engagement plus global et plus pratique.

De plus, certains des travaux étudiés sont complémentaires : les travaux de Couture et al. (2024) poursuivent l'expérience de Passalacqua et al. (2024a) et visent à remédier à la dégradation de l'engagement provoqué par une IA sur un processus de contrôle qualité par l'ajout d'une technologie tierce : un système de réalité augmentée. Il apparait alors cohérent d'imaginer une I5.0 dans laquelle certaines technologies viendraient renforcer la performance des individus, mais détérioraient leur engagement, et d'autres technologies viendraient simplement renforcer leur engagement pour compenser les effets des premières technologies. Le modèle d'engagement devrait donc présenter différents leviers sur lesquels il serait possible d'agir pour accroitre l'engagement.

Le modèle Octalysis (Chou, 2015) semble répondre à ce constat. Ce modèle, inspiré de la gamification, est défini par son auteur comme un outil de conception d'expériences engageantes. Il présente huit leviers d'engagement, appelés Core Drivers, et dont la traduction serait Sens, Pouvoir, Accomplissement, Influence Sociale, Propriété, Imprévisibilité, Rareté et Perte. Nous avons appliqué ce modèle au corpus d'articles retenus. Pour chaque article, nous avons analysé la manière dont les auteurs déterminaient l'impact des technologies étudiées sur l'engagement. Puis, pour chaque *raison* avancée, nous avons fait le lien avec un des huit leviers d'engagement de l'Octalysis. En croisant ces données avec les technologies au cœur de chaque article, il nous a été possible de dresser une première ébauche d'une matrice présentant l'impact des technologies sur l'engagement (figure 6). Les lignes présentent les technologies étudiées dans les articles et les colonnes les huit leviers d'engagement. Le nombre présent à chaque intersection est un compteur : +1 pour chaque *raison* qualifiée renforçant le levier, et -1 pour chaque *raison* dégradant le levier.

	Cobotique	IA	CPS	RA	Sys. Num.
Sens		-1		2	1
Pouvoir		0	1	2	2
Influence Sociale	1	1		1	3
Imprévisibilité					
Perte			1	1	
Rareté	1				
Propriété	1	1		1	1
Accomplissement	2	1		1	2

Figure 6. Matrice du renforcement des leviers d'engagement par les nouvelles technologies.

5 CONCLUSION

Cette étude a analysé l'impact des nouvelles technologies sur l'engagement des employés dans l'I5.0 à travers une revue de la littérature. Les résultats montrent que, bien que la majorité des études identifient un renforcement de l'engagement, elles s'appuient souvent sur des approches hétérogènes, voire indirectes. Certaines technologies apparaissent comme des leviers majeurs, mais leur effet varie en fonction du contexte d'application et des méthodologies employées. L'intégration du modèle Octalysis a permis de structurer ces résultats en identifiant les leviers précis sur lesquels ces technologies influencent l'engagement.

Malgré une méthodologie rigoureuse, plusieurs limites doivent être prises en compte. Tout d'abord, la sélection des études repose sur des critères spécifiques, ce qui peut exclure certaines recherches pertinentes sur des technologies spécifiques (le mot clé utilisé étant l'Industrie 5.0 uniquement) ou émergentes. Par ailleurs, la matrice proposée (figure 6) n'est qu'une simple ébauche qui repose uniquement sur une analyse théorique. Elle n'a pas encore été validée empiriquement, ce qui demanderait une évaluation empirique ou prospective (par l'utilisation d'une méthode Delphi-Régnier). Enfin, l'approche adoptée considère chaque levier d'engagement individuellement, sans examiner les effets d'interactions entre leviers, qui pourraient être synergiques ou antagonistes.

Afin de renforcer la robustesse du modèle d'engagement proposé et affiner l'interprétation de la matrice (figure 6), il apparaît nécessaire de valider les associations entre technologies et leviers d'engagement en s'appuyant sur un consensus d'experts du domaine. En combinant cette analyse qualitative avec des études expérimentales approfondies, il serait possible de construire un cadre plus normé et généralisable pour évaluer l'impact des technologies sur l'engagement dans l'I5.0.

6 RÉFÉRENCES

Aital, P., Patil, R., Parimi, S., & Singh, P. (2022). Industry 4.0 : An Overview and Further Research Directions. In S. Fong, N. Dey, & A. Joshi (Éds.), *ICT Analysis and Applications* (p. 75-85). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-16-5655-2_8

Bajic, B., Rikalovic, A., Suzic, N., & Piuri, V. (2024). Toward a Human-Cyber-Physical System for Real-Time Anomaly Detection. *IEEE Systems Journal*, *18*(2), 1308-1319. https://doi.org/10.1109/JSYST.2024.3402978

Buisine, S., Sartore, M., Ocnarescu, I., & Joly, L.-R. (2024). A model-driven approach for prospective ergonomics : Application to ikigai robotics. *Ergonomics*, 1-11. https://doi.org/10.1080/00140139.2024.2418960

Chou, Y. (2015). *Actionable Gamification : Beyond Points, Badges and Leaderboards*.

Couture, L., Passalacqua, M., Joblot, L., Magnani, F., Pellerin, R., & Léger, P.-M. (2024). Adaptive System to Enhance Operator Engagement during Smart Manufacturing Work. *Sensors & Transducers.*, *265*(2), 106-119.

Deci, E. L., & Ryan, R. M. (2008). Self-determination theory : A macrotheory of human motivation, development, and health. *Canadian Psychology / Psychologie canadienne*, *49*(3), 182-185. https://doi.org/10.1037/a0012801

European Commission. Directorate General for Research and Innovation. (2021). *Industry 5.0 : Towards a sustainable, human centric and resilient European industry.* Publications Office. https://data.europa.eu/doi/10.2777/308407

Garofalo, F., & Puangseree, P. (2023). Human Factors in Manufacturing : A Systematic Literature Review. In V. G. Duffy (Éd.), *Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management* (p. 355-367). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35741-1_27

Geng, B., & Varshney, P. K. (2022). Human-Machine Collaboration for Smart Decision Making : Current Trends and Future Opportunities. *2022 IEEE 8th International Conference on Collaboration and Internet Computing (CIC)*, 61-67. https://doi.org/10.1109/CIC56439.2022.00019

Goujon, A., Rosin, F., Magnani, F., Lamouri, S., & Pellerin, R. (2024, en cours). The impact of new technologies on employee autonomy in decision-making : A systematic literature review. *SOHOMA: International Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing*.

Granata, I., Faccio, M., & Boschetti, G. (2024). Industry 5.0 : Prioritizing human comfort and productivity through collaborative robots and dynamic task allocation. *Procedia Comput. Sci.*, *232*(C), 2137-2146. https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.02.144

Hoenig, A., Roy, K., Acquaah, Y. T., Yi, S., & Desai, S. S. (2024). Explainable AI for Cyber-Physical Systems : Issues and Challenges. *IEEE Access*, *12*, 73113-73140. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3395444

Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation of Companies – UPDATE 2020. (s. d.). *Acatech - National Academy of Science and Engineering*. Consulté 6 juin 2024, à l'adresse https://en.acatech.de/publication/industrie-4-0-maturity-index-update-2020/

Manurung, J. S., Nugroho, F. A., Sitorus, S. A., Ardiani, W., & Aditi, B. (2024). Leadership Strategies for Managing Human and Technological Diversity in the Industrial 5.0 Era : A Systematic Review. *Journal of Ecohumanism*, *3*(7), Article 7. https://doi.org/10.62754/joe.v3i7.4370

Margherita, E. G., & Braccini, A. M. (2022). The impact of Industry 4.0 technologies and the soft side of TQM on organisational performance : A multiple case study analysis on manufacturing organisations. *TQM Journal*. Scopus. https://doi.org/10.1108/TQM-01-2022-0022

Nair, A., Pillai, S. V., & Senthil Kumar, S. A. (2024). Towards emerging Industry 5.0 – a review-based framework. *Journal of Strategy and Management*, *ahead-of-print*(ahead-of-print). https://doi.org/10.1108/JSMA-04-2023-0067

Nenna, F., Zanardi, D., Orlando, E. M., Nannetti, M., Buodo, G., & Gamberini, L. (2024). Getting Closer to Real-world : Monitoring Humans Working with Collaborative Industrial Robots. *Companion of the 2024 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, 789-793. https://doi.org/10.1145/3610978.3640632

O'Brien, H. L., Cairns, P., & Hall, M. (2018). A practical approach to measuring user engagement with the refined user engagement scale (UES) and new UES short form. *International Journal of Human-Computer Studies*, *112*, 28-39. https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2018.01.004

Paes, V. M., Silveira, F. F., & Akkari, A. C. S. (2023). Social Impacts of Artificial Intelligence and Mitigation Recommendations : An Exploratory Study. In Y. Iano, O. Saotome, G. L. Kemper Vásquez, C. Cotrim Pezzuto, R. Arthur, & G. Gomes de Oliveira (Éds.), *Proceedings of the 7th Brazilian Technology Symposium (BTSym'21)* (p. 521-528). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-04435-9_54

Passalacqua, M., Pellerin, R., Magnani, F., Doyon-Poulin, P., Del-Aguila, L., Boasen, J., & Léger, P.-M. (2024). Human-centred AI in industry 5.0 : A systematic review. *International Journal of Production Research*, *0*(0), 1-32. https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2406021

Passalacqua, M., Pellerin, R., Yahia, E., Magnani, F., Rosin, F., Joblot, L., & Léger, P.-M. (2024). Practice With Less AI Makes Perfect : Partially Automated AI During Training Leads to Better Worker Motivation, Engagement, and Skill Acquisition. *International Journal of Human–Computer Interaction*. https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10447318.2024.2319914

Psarommatis, F., May, G., & Azamfirei, V. (2023). The Role of Human Factors in Zero Defect Manufacturing : A Study of Training and Workplace Culture. In E. Alfnes, A. Romsdal, J. O. Strandhagen, G. von Cieminski, & D. Romero (Éds.), *Advances in Production Management Systems. Production Management Systems for Responsible Manufacturing, Service, and Logistics Futures* (p. 587-601). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43662-8_42

Salvadorinho, J., Bastos, T., Pintor, P., & Teixeira, L. (2024). Lean Manufacturing vs Coaching Alliance in Engagement Promotion : An Employee Suggestion System Prototype. In F. J. G. Silva, L. P. Ferreira, J. C. Sá, M. T. Pereira, & C. M. A. Pinto (Éds.), *Flexible Automation and Intelligent Manufacturing : Establishing Bridges for More Sustainable Manufacturing Systems* (p. 332-339). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-38165-2_39

Santana, A. L. M., & de Deus Lopes, R. (2020). Active Learning Methodologies and Industry 4.0 skills development—A Systematic Review of the Literature. *2020 XV Conferencia Latinoamericana de Tecnologias de Aprendizaje (LACLO)*, 1-10. https://doi.org/10.1109/LACLO50806.2020.9381161

Schaufeli, W. B., Bakker, A. B., & Salanova, M. (2006). The Measurement of Work Engagement With a Short Questionnaire : A Cross-National Study. *Educational and Psychological Measurement*, *66*(4), 701-716. https://doi.org/10.1177/0013164405282471

Schaufeli, W. B., Salanova, M., Lez-Roma, V. G., & Bakker, A. B. (2002). *THE MEASUREMENT OF ENGAGEMENT AND BURNOUT: A TWO SAMPLE CONFIRMATORY FACTOR ANALYTIC APPROACH*.

Schuh, G., Anderl, R., Dumitrescu, R., Krüger, A., & ten Hompel, M. (2020). *Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation of Companies – UPDATE 2020*. Acatech. https://en.acatech.de/publication/industrie-4-0-maturity-index-update-2020/

Sun, L., & Bunchapattanasakda, C. (2019). Employee Engagement : A Literature Review. *International Journal of Human Resource Studies*, *9*(1), 63. https://doi.org/10.5296/ijhrs.v9i1.14167

Zheng, T., Ardolino, M., Bacchetti, A., & Perona, M. (2019). Enabling technologies, impacts and challenges of "industry 4.0" in the manufacturing context : Some insights from a preliminary literature review. *Publications of Darmstadt Technical University, Institute for Business Studies (BWL)*, Article 129474. https://ideas.repec.org//p/dar/wpaper/129474.html

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Ordonnancement et planification multi-ressources

DAHIBOU FALL SOW [1], MERIEM TOUAT[1], HAOXUN CHEN[1]

[1] Computer Science and Digital Society (LIST3N), Université de Technologie de Troyes,
12 RUE MARIE CURIE, CS 42060, TROYES (10300). FRANCE,
{dahibou.sow, meriem.touat, haoxun.chen}@utt.fr

Résumé

Dans un contexte industriel hautement compétitif, les entreprises manufacturières cherchent à transformer leurs usines vers le modèle de l'industrie 4.0, en s'appuyant sur des technologies avancées telles que l'internet des objets, l'intelligence artificielle et la cobotique. Cette transition soulève de nouveaux défis, notamment en matière d'ordonnancement et de planification. En effet, dans l'usine du futur, différentes ressources robots et opérateurs humains interagis sent pour accomplir des tâches complexes, nécessitant la mise en œuvre de nouvelles approches d'ordonnancement capables de coordonner efficacement ces ressources hétérogènes. Or, les méthodes d'ordonnancement traditionnelles s'avèrent souvent insuffisantes, car elles se con centrent généralement sur un seul type de ressource, soit les robots, soit les humains. La présente étude aborde un problème d'ordonnancement multi-ressources, intégrant conjointement des robots et des opérateurs humains, en rupture avec les approches classiques. Nous proposons un modèle de programmation linéaire en nombres entiers mixtes (MILP) pour formuler ce problème, et nous développons une méthode exacte afin de le résoudre efficacement.

Abstract

In today's highly competitive industrial environment, manufacturing companies are striving to transform their production systems in line with Industry 4.0, leveraging advanced technologies such as the Internet of Things, artificial intelligence, and collaborative robotics. This transition introduces new challenges, particularly in scheduling and planning tasks. In the factory of the future, diverse resources including robots and human operators work together to accomplish complex tasks, requiring new scheduling approaches capable of efficiently coordinating these heterogeneous agents. Traditional scheduling methods often fall short, as they typically focus on only one type of resource, either robots or humans. This study addresses a multi-resource scheduling problem that jointly integrates robots and human operators, in contrast to conventional approaches. We propose a mixed-integer linear programming (MILP) model to represent the problem and develop an exact method to solve it efficiently.

Mots clés : **Ordonnancement, planification, opérateurs humains, robots**

CIGI QUALITA MOSIM 2025
A Smart Logistics Architecture Using IoT and Hashgraph

Zineb IHROUCHEN[1], OMAR SOUISSI[2]

[1] DATA ANALYTIC, OPERATIONS AND DECISION, INPT
Rabat, Morocco
zineb.ihrouchen@gmail.com

[2] DATA ANALYTIC, OPERATIONS AND DECISION, INPT
Rabat, Morocco
souissi@inpt.ac.ma

Résumé –
Au cours des dernières décennies, le secteur industriel a connu d'importants progrès technologiques dans le domaine de la logistique. Cette évolution a donné naissance à la 'Logistique Intelligente', qui fait référence à l'intégration de technologies avancées telles que l'Internet des objets (IdO), la TRD (Technologie de registre distribué) dans la logistique. Hashgraph [Baird, 2016] est une technologie d'innovation numérique de confiance. En tant que type de TRD, elle est reconnue pour ses caractéristiques de rapidité et de faible coût. Les dispositifs IdO jouent un rôle crucial dans la surveillance en temps réel de l'environnement logistique. La combinaison de ces deux technologies permet de remédier aux failles de sécurité inhérentes dans les IdO. Cet article souligne la contribution de l'IdO et de la technologie Hashgraph au bénéfice de la logistique et présente une architecture des systèmes logistiques moins coûteux et respectueux de l'environnement, basés sur Hashgraph et l'IdO. Les résultats de l'évaluation montrent que la solution que nous proposons résout efficacement les problèmes de performance et de durabilité des systèmes logistiques. En outre, son faible coût, son efficacité et sa consommation d'énergie minimale en font un choix recommandé pour les entreprises logistiques.

Abstract – **Over the last decades, the industrial sector has known significant technological progress, that led to major improvements in logistics. This evolution has given rise to the concept of 'Smart Logistics', which refers to the integration of advanced technologies such as Internet of things (IoT), DLT (Distributed Ledger Technology) ... in logistic. Hashgraph [Baird, 2016] is a trusted digital innovation technology, as a type of DLT, it is recognized by its characteristics of sustainability, rapidity, and low cost..., IoT devices play a crucial role in enabling real-time monitoring of the logistics environment... The combination of these two technologies not only enhances overall performance but also addresses the security vulnerabilities inherent in IoT. This paper highlights the contribution of IoT and Hashgraph technology for the benefit of future logistics and presents an architecture for low-cost and echo-friendly logistics systems based on IoT-enabled Hashgraph technology. The evaluation results show that our proposed solution effectively solves logistics system challenges related to performance, and sustainability. Moreover, its low cost, efficiency and minimal energy consumption make it a recommended choice for both small and big-sized logistics companies and stakeholders.**

Mots clés – **Logistique 4.0, Industrie X.0, Internet des Objets, Hashgraph**
Keywords – **Logistic 4.0, Industry X.0, Internet of Things, Hashgraph**

1 INTRODUCTION

Logistics refers to the process of procurement, storage, and transport of goods from producers to customers, it involves different stakeholders. The purpose is to achieve the seven R principles: ensuring the right product is delivered to the right customer with the exact quantity and quality, on time and at affordable cost. The progress of technologies in the era of Industry X.0 [Soebandrija et al., 2021] plays a crucial role in the development of Smart logistics [Cimini et al., 2020][Winkelhaus et Grosse, 2019], which represents a model of advanced logistics systems. This concept provides a new vision, aiming to enhance the efficiency of services, and solve many problems in the industrial sector. Many researchers are investigating to evaluate the performance in logistics. P.Robert [Philipp, 2020] highlights that a country's economic growth is linked to the improvement of its logistics operations and the use of advanced tools to drive digital transformation. In this context, adopting key technologies such as IoT [Song et al., 2020], DLT [Farahani et al., 2021], and AI are mandatory for satisfying future smart logistics needs [Douaioui et al., 2024][Chaabane et al.], and necessary for solving logistic

challenges. The IoT defines connected sensors for various uses, it helps monitor goods, track vehicles, and collect real-time data. Despite all these advantages, these collected data may encounter some security issues [Anwar et al., 2020], potentially affecting the logistics system leading to a delay, increased cost, or other disruption. In addition, there is a high risk of total loss of sensitive data based on centralized databases, stored in single layer. DLT such as Hashgraph seems to be effective solution to address this type of problem due to its features of decentralization, security, immutability and transaction's transparency. This makes it more resistant to attacks, data is stored safely and visible to all participants. In practice, Hashgraph, together with IoT reveals several advantages and added value for log 4.0. Currently, most companies are looking to enhance their logistic management and customer services. For this to work, they adopt new methods for automating logistics operations.One of the leaders in logistics and express delivery, Amazon [Bagnoli et al., 2022] and FedEx [Musienko, 2023] are integrating new technologies into logistics process. Inside their warehouses, they use drones for parcel transportation [Anderson, 2024], sensors devices and blockchain technology for monitoring environmental conditions to boost efficiency and minimize time delivery, When it comes to food safety, the situation becomes strict and critical, the reason why IBM and Walmart enlarge its blockchain collaboration [IBM, 2024] with food suppliers counting Nestle and Unilever in order to improve food traceability [Kamath, 2018]. This paper aims to contribute to the improvement of Logistics 4.0 through new technologies, introducing our proposed intelligent logistic transport system that explores the potential of IoT and Hashgraph to attain core objectives:

- Online Monitoring: monitor environmental conditions in real-time using sensors.
- Secure Storage of Data: address the problem of security lack by storing data in hashgraph network.
- Cost optimization: hedera provides the lowest cost transaction.
- Data Visualization: a monitoring environment Interface used to send alerts when conditions change.
- Sustainability: hedera technology used by our system doesn't generate a high carbon footprint.

Our article has followed this structure: the section 2 reviews the previous work on the integration of Hashgraph and IoT , the section 3 sheds light on a comparison between 'Hashgraph' and 'Blockchain', and presents our proposed architecture,
section 4 deals with the system's evaluation.

2. LITERATURE REVIEW

In this section, we present some previous work related to exploring the combined application of Hashgraph and IoT for innovative solutions, we conducted informal research across Google Scholar databases, with a focus on new English articles published between 2019 and 2025. Using the keywords (”Hashgraph”) OR (”Hedera”) AND (”IoT”) OR (“Internet of things”) AND (”Smart logistic”).
We have noticed a sharp increase in the number of articles published during these years.

S.Jha et al. address key challenges of scalability, interoperability and energy consumption of blockchain and proposes a Hashgraph-based key management framework to improve the security and efficiency of autonomous vehicles. In this study, they introduce Hashgraph as a solution to ensure better scalability and higher transaction speed for IoT applications [Jha et al., 2022]. L.Zhao et al. promote the use of Directed Acyclic Graph (DAG)-based models to improve blockchain performance in the context of IoT. There are two DAG models: first, IOTA, which uses a data structure named Tangle, where each transaction must approve two previous transactions. It allows for decentralized and faster transaction validation. The second is Hashgraph, which is based on an asynchronous Byzantine Fault Tolerant (BFT) consensus algorithm. They propose several evaluation criteria such as network synchrony, storage overhead, finality, performance, tolerated power of an adversary, scalability, and finally incentives. With these criteria, the authors give a high evaluation to the performance of IOTA and Hashgraph in the IoT context. [Zhao et Yu, 2019]. The article introduces a novel framework using Directed Acyclic Graph (DAG) for managing IoV (a subset of IoT) traffic . It proposes sharding and Hashgraph, a DAG-based consensus mechanism, to address challenges like communication efficiency and latency. The system model includes On-Board Units, Roadside Units, and a Cloud Server. The sharding model proposed in this study adjusts nodes based on trust values and stability scores and Hashgraph uses tree-based broadcasting for efficient transaction processing, resists Sybil and view split attacks, and maintains a global DAG ledger for data consistency [Chen et al., 2024]. U.Timalsina combine the OSGi framework for service sharing and Hashgraph for distributed ledger to incentivize service sharing in IoT. They introduce a value-based system where they use the Hashgraph to reward service providers, promoting trustworthiness with decentralized service exchange in an unreliable IoT environment, explaining its high performance, and its high transaction throughput to reduce scalability challenges in IoT. Furthermore, it discusses the use of smart contracts to provide secure value transfer between services [Timalsina et Wang, 2019]. A.Verma et al. present a distributed IIoT data system based on a blockchain technology, improved using sharding hashgraph consensus mechanism and a node evaluation mechanism. Moreover, they use deep reinforcement learning to solve node sharding problem.The proposed IIoT system has been evaluated to be highly efficient, comparing to existing consensus algorithms such as HoneybadgerBFT and BEAT [Gao et al., 2022]. C.G.Amarillo et al. developed a security framework for surveillance using a hashgraph-based framework, ensuring tamperproof event logging, scalability, and resilience against DDoS and Sybil attacks. They integrated lightweight edge-level detection with cloud-based analysis, XOR-based encoding, and AES-256 encryption. The system demonstrated high performance in transaction speed and scalability [Verma et al., 2024].

3. ROPOSED WORK

This section is dedicated to a review comparison between two popular DLT (fig.1) and the presentation of our proposed model, the use case of the solution, the design of the system and the materials for its implementation.

3.1 Comparison between Hashgraph and Blockchain

After a benchmarking study, we choose hashgraph that best suited our needs based on energy consumption, cost and performance.
Hashgraph, is a distributed registry technology that excels in speed, security and performance. It was conceived by Leemon baird in 2016, and has been tested in real-world conditions since mid-2018. It uses a consensus model [Baird 2019]alled gossip. Each node in the network assembles its own acyclic

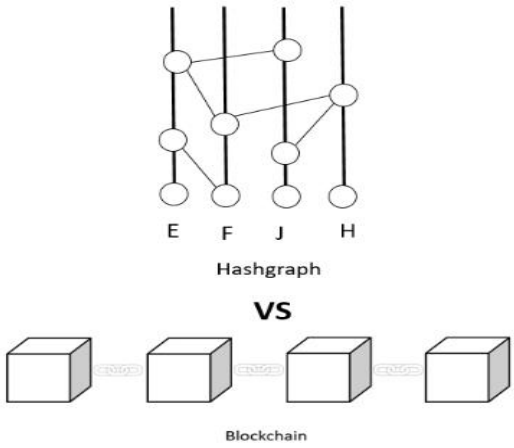


Figure 1. Mechanism of hashgraph and blockchain

directed graph [Živić et al., 2020] representing existing events, based on data transmitted by other nodes. While Blockchain [Tessone et al., 2024]is a peer-to-peer distributed network that allows transactions to be recorded in secure, immutable blocks of data and stored chronologically between transactions. It is characterised by decentralisation, transparency, immutability and efficiency.

The main difference between them is that Hashgraph uses a consensus protocol called ”gossip about gossip”, while blockchain mainly uses proof of work. As a result, Hashgraph is faster and more efficient than Blockchain. Both blockchain and hashgraph are distributed ledger technologies used to store transaction data. Hashgraph is characterised by low transaction costs, with an average of $0.0001 per transaction, while blockchain $0.20 per transaction [Alahmad et al., 2022]. Researchers from the University College of London conducted a study [Platt et al., 2021] comparing five popular DLTs: Ethereum2.0, Algorand, Cardano, Polkadot, Tezos, and Hedera. They found that DLT-based Pos mechanisms consume less energy than Pow, and Hedera was found to be the most efficient, consuming less energy per transaction and relying on fewer validators [Lamriji et al., 2023]. Hedera takes the lead given that it consumes less energy on the average of 0.00002–0.00004 (kWh) per transaction

Tableau1. KEY DIFFERENCE BETWEEN BLOCKCHAIN AND HASHGRAPH

	Blockchain	**Hashgraph**
Efficiency	Less efficient compared to Hashgraph	More efficient compared to Blockchain
Validation Approach	Proof of Stake (PoS) or Proof of Work (PoW)	”Gossip about Gossip” protocol & Virtual voting
Transaction Cost	Transaction fees often present	No mining fee
Energy Consumption	More energy intensive and a significant carbon footprint.	Less energy intensive and a low carbon footprint.
Tx Processing Speed	7-10 transactions per second	10000 transactions per second

3.2 A new system architecture for smart logistics

To transport fresh products in a container while ensuring specific temperature and humidity conditions requires a monitoring system to check these variables in real time. Using IoT sensors for real-time traking is essential but security challenges prevent this. So the integration of Hashgraph with IoT can solve that. Thus we proposed an IoT-Hashgraph-based architecture for efficient logistic management.

Use Case:

The use case consists of transporting fresh product in a container, ensuring maintained temperature and humidity conditions. This requires a monitoring system to check these conditions in real-time. To test this scenario, a transport environment was simulated with temperature and humidity sensors. The environmental conditions then changed to test the system’s ability to detect and respond to these changes.

Model presentation and design

The project aims to develop an innovative IoT solution to monitor the environmental conditions of containers. We are using DHT11 temperature and humidity sensors to collect critical data about the condition of the products. Sensors and devices are registered first in the MongoDB database with a unique DeviceID and then registered in hashgraph through the web application interface as Non Fungible Tokens (NFTs), and a topic is then created and associated to each container. This data collected from the physical layer is then securely stored on the Hedera platform. In this way, a smart contract logic has been encoded to ensure secure storage for DeviceID, times-tamps, temperature and humidity data. It contains functions designed to manage data associated with each sensor (NFT) and transmit it through the appropriate topic. (all sensors of the same container publish data on the same topic). Finally, we develop intuitive dashboards to visualize this data, giving users a clear and accurate view of the status of their products throughout their journey. The solution is implemented using tools described below:

- Temperature and Humidity Sensors: The DHT11 units measure the temperature and humidity of the environment. They are connected to the Raspberry to provide data for monitoring.
- Raspberry Pi This is the single board computer used as the MQTT gateway. It receives data from sensors and transmits it to the MQTT broker shiftr.io.
- Broker MQTT shiftr.io: is an MQTT cloud server that enables communication between devices. It receives the data published by the Raspberry Pi and distributes it to subscribers who have subscribed to that data.
- Hedera Topic: A topic is created to manage the flow of messages for an application, such as a marketplace where people bid on products.
- Hedera NFT: A NFT is a type of cryptographic token that represents a unique item.
- Hashgraph integration: To ensure data integrity, security and to manage data flow a smart contract is implemented.
- Metamask wallet & Remix ethereum: Used for smart contract deployement on hedera and viewing deployement fees.
- Dashboard App: Visualizing temperature and humidity data.

The figure 2-A presents a design for our system:

Our sotution is implemented following these steps :

- Step 1-2: Registration of logistics stakeholders on hedera and IoT devices info on MongoDB via the Web app, where they are assigned a unique DeviceID.
- Step 3: An NFT is automatically created on the Hedera platform for each registered device.

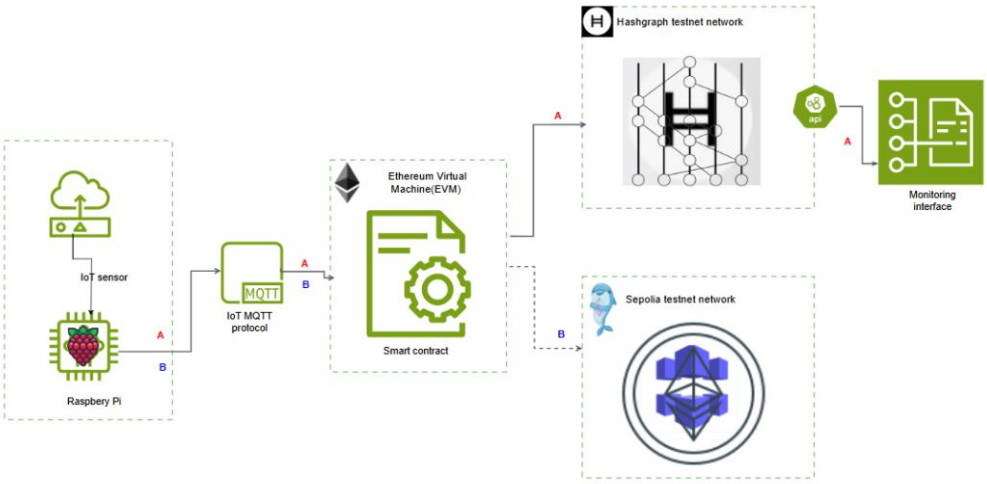


Figure 2. Smart logistic system's architecture

- Step 4: The data collected by the sensors from the product containers are stored in Hedera, the transfer is managed by a web application that transmits the data as messages in a predefined topic on the Hedera network, interacting with smart contract that manage the data flow.
- Step 5: The data (the messages) are retrieved from this topic and displayed on dashboards visible to the user.
- Step 6: The monitoring app provides stakeholders with real-time visibility of temperature and humidity conditions throughout the whole fresh produce delivery process.
- Step 7: Once the temperature or humidity exceeds a certain threshold, an alert is triggered on the app to notify the user.
- Step 8: Stakeholders request some information; history of data, and other necessary info registred on the hedera network.
- Step 9: The result of the request is send to the user via the monitoring app.

The figure 3 presents a diagram of sequence that illustrates the interaction between logistics stakeholders, hedera, iot and monitoring app.

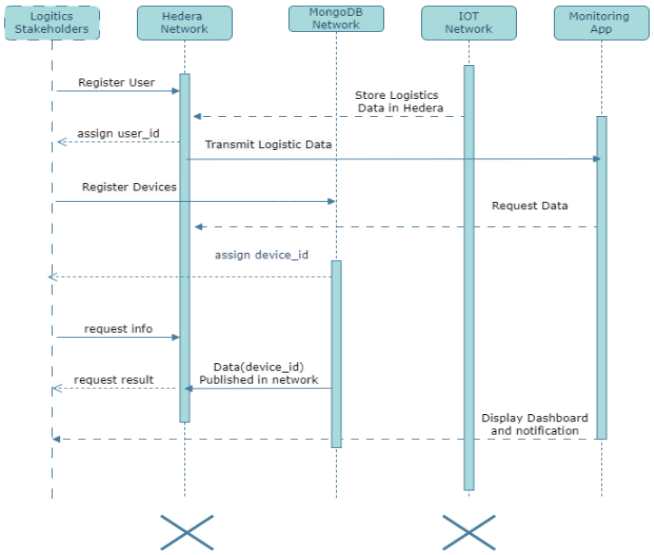


Figure 3. sequence diagram of system

4. RESULT

A test scenario involving the transport of sensitive products in a state of temperature between 1 and 5 and humidity between 10 and 20, with variations from time to time, was simulated. Then, it was displayed in real-time on the monitoring system with alerts if the state was outside its limits.

Figure 4 shows how temperature and humidity vary during transport of goods as simulated in this study.

5. SYSTEM COST EVALUATION

Our system consists of a device, a smart contract, a topic and a token. We calculated an average of 100 transactions per 10 minutes using one sensor.

To evaluate our system in terms of cost, a key performance indicator (KPI) for manufacturers, we compared it with a monitoring system proposed by N. CHBAIK et al. [Chbaik et al., 2024] have proposed a solution regarding a blockchain-assisted IoT frame work focusing on temperature and humidity sensing for sensi tive supply chain operations. It focuses on improving real-time monitoring, efficient management, and privacy protection in the system. The framework is well structured, and researchers have discussed all its layers in detail. However, in terms of cost consideration, the cost associated with Ethereum blockchain transactions are very high. The role of cost-effectiveness is equally important for manufacturers' ability and capabilities. Therefore, the proposed model provides a low cost solution thanks to hashgraph consensus that fits all companies.

We conducted a comparison study, implementing the same system, with a smart contract deployed on Sepolia testnet (Ethereum network), figure 2-B and then estimated the system fees including contract deployment and other fees.

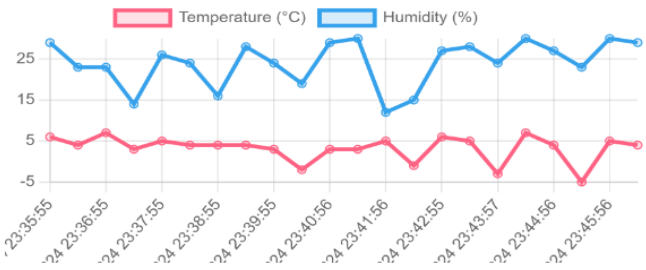


Figure 4. sequence diagram of system

Regarding to [Hedera, 2024], On average, HBAR charges $0.0001 for every transaction executed on the Hedera network, while ethereum takes an average fee of $0.20 for each transaction executed in the ethereum network. Regarding to our Metamsak wallet, the fees deducted from the balance to deploy smart contracts on the Sepolia network are 36.51 $US and 0.01 $US
on Hedera testnet network.
The following equations is used to calculate the estimated cost of the two systems:

Equation (1)

$$C_{Hedera} = C_{Hedera\ deployment} + N_{tx} * C_{Hedera\ tx}$$

- $C_{Hedera\ deployment}$: Smart contract deployment fees.
- N_{tx}: Number of transactions.
- $C_{Hedera\ tx}$: Hedera Cost per transaction.

Equation (2)

$$C_{Ethereum} = C_{Ethereum\ deployment} + N_{tx} * C_{Ethereum\ tx}$$

- $C_{Ethereum\ deployment}$: Smart contract deployment fees.
- $C_{Ethereum\ tx}$: Ethereum Cost per transaction.

We increased the number of transactions to see the variation in cost for the two systems see table below:

Tableau 2. GLOBAL COST PER SYSTEM

Numbre of tx	Ethereum (USD)	Hashgraph (USD)
1	276.47	0.0101
10	452.42	0.011
100	2211.92	0.02
1000	19806.92	0.11
10000	195 576.92	1.01

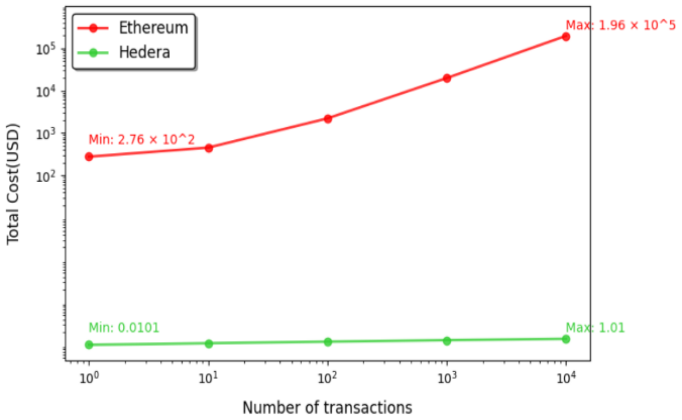


Figure 5. System cost is correlated with transaction

As the number of sensors increases means the number of transactions increases, the system's cost based Ethereum rises dramatically, leading to significant impact. Our solution offers a much low cost and more efficient alternative.

Features of our solution;

Our proposed solution integrates IoT devices and Hashgraph technologies to enhance logistic transport in terms of efficiency and security.

Our solution is Unique, Why ?

- Performance and efficiency: Are defined in terms of transact tion speed which is estimated an average of 3.46 seconds to consensus, finally execution and high throughput which hande about 10,000 transactions per second (TPS) [Platt et al., 2021].
- Decentralized Privacy and Security: The Hashgraph consensus algorithm is based on Asynchronous Byzantine Fault Tolerance (aBFT), which ensures the security of transactions on the network. Even in the event of malicious behavior from some nodes, the algorithm continues to operate. Furthermore, the use of gossip and gossip makes it more secure, as it creates a record of each transaction along each path through the network. The cryptographic signing of transactions and data serves to guarantee that only the account holder with legitimate access can initiate transactions [Baird, 2019].
- Eco-Friendly: Hashgraph consensus mechanisms do not require a significant amount of computational power. This leads to low energy consumption [Nikolaou et Anthopoulos, 2024] and a negligible carbon footprint. our architecture system is based on this clean technology which makes it eco-friendly and sustainable.
- Economic cost: one more advantage of solution is the low cost of materials and technologies, sensor DHT11 is cheap, and raspberry Pi too, for the hedera technology used, no matter the complexity of the system and the number of transactions it executes, the cost will be invariably lower than other DLTs, because he requires just 0.0001$ per transaction.
- Traceability: our system is based on Hedera consensus service for creating NFTs and Topic, which use Hedera ledger for creating decentralized, auditable logs of immutable and timestamped events.

6 CONCLUSION

The concepts of Logistics 4.0 and DLT, including the Hash-graph as a specific example, represent two nascent paradigms that are still evolving. They are attracting the attention of many researchers and manufacturers. When using them together with the IoT, they offer significant potential for the advancement of smart logistics transportation. Hashgraph technology provides logistic field with enhanced security, transparency, and immutability of transaction data between various stakeholders in the communication process. This represents a significant research challenge that requires considerable attention. It is reasonable to assert that our solution which integrates the technology Hashgraph with IoT for enhancing security and sustainability issues in logistics and transport field is distinctive in comparison to existing solutions, offering a unique combination of features efficiency, low-cost and echo friendly. In conclusion, it can be stated that our 4.0 traceability solution is not merely a technical innovation; rather, it represents a manifesto for a future that is better for all. A future in which innovation and sustainability are mutually reinforcing to drive the advancement of countries.

Limitations of the solution: Our system has proven its

effectiveness in a controlled environment but is not tested in a real environment. the study does not account for all the variables and challenges that could arise in real-world situations impacted by external factors such as network latency, and network coverage... We planned a test in a logistic environment for our future work.

7 REFERENCES

Leemon Baird, "The Swirlds Hashgraph Consensus Algorithm: Leemon Baird. (2016). The Swirlds Hashgraph Consensus Algorithm: Fair, Fast, Byzantine Fault Tolerance. Swirlds Tech Report SWIRLDS-TR-2016-01, May 31.

Soebandrija, K. E. N., Samara, A. K., Wiratama, A. W., Sasabone, C. D., Gunanjar, O., & Toar, Z. (2021). Industry X.0 and Sustainability through Lens of Industrial Engineering, Product Design Engineering, and Business Engineering Perspectives.

Cimini, C., Lagorio, A., Romero, D., Cavalieri, S., & Stahre, J. (2020). Smart Logistics and The Logistics Operator 4.0. International Journal of Production Research, 53(2), 10615-10620.

Winkelhaus, S., & Grosse, E. H. (2019). Logistics 4.0: A Systematic Review Towards a New Logistics System. International Journal of Production Research, 57(18), 18-43.

Philipp. (2020). Digital Readiness Index Assessment Towards Smart Port Development.

Song, Y., Yu, F. R., Zhou, L., Yang, X., & He, Z. (2020). Applications of the Internet of Things (IoT) in Smart Logistics: A Comprehensive Survey. IEEE Access, 8, 28 October.

Farahani, B., Firouzi, F., & Luecking, M. (2021). The Convergence of IoT and Distributed Ledger Technologies (DLT): Opportunities, Challenges, and Solutions. Future Generation Computer Systems, 177(1), 102936.

Anwar, R. W., Zainal, A., Abdullah, T., & Iqbal, S. (2020). Security Threats and Challenges to IoT and its Applications: A Review.

Bagnoli, P., Albarelli, P., Biazzo, G., Biotto, G., Marseglia, L., Massaro, S., Messina, G., Muraro, M., & Troiano, G. (2022). The Integration of Digital Business Models: The Amazon Case Study. In Digital Business Models for Industry 4.0 (pp. 211-239). Springer, Cham.

Musienko, Y. (2023, February 8). Blockchain Implementation in Supply Chain Management (SCM). Retrieved from Merehead.Com.

Anderson, E. (2024). Blockchain's Impact on Parcel Tracking Systems. Thesis, UAS, May.

IBM. (2024). What is Blockchain Technology? Retrieved January 18, 2024, from https://www.ibm.com/topics/blockchain.

Kamath, R. (2018). Food Traceability on Blockchain: Walmart's Pork and Mango Pilots with IBM. Northwestern University, Chicago, IL, USA.

Jha, S., Jha, N., Prashar, D., Ahmad, S., Alouffi, B., & Alharbi, A. (2022). Integrated IoT-Based Secure and Efficient Key Management Framework Using Hashgraphs for Autonomous Vehicles to Ensure Road Safety.

Zhao, L., & Yu, J. (2019). Evaluating DAG-Based Blockchains for IoT.

Chen, R., Luo, H., Sun, G., Yu, H., Niyato, D., & Dustdar, S. (2024). DRDST: Low-Latency DAG Consensus through Robust Dynamic Sharding and Tree-Broadcasting for IoV.

Timalsina, U., & Wang, A. (2019). Incentivizing Services Sharing in IoT with OSGi and HashGraph.

Gao, N., Huo, R., Wang, S., Huang, T., & Liu, Y. (2022). Sharding-Hashgraph: A High-Performance Blockchain-Based Framework for Industrial Internet of Things with Hashgraph Mechanism.

Verma, A., Chandela, T., Rathee, G., & Tomar, A. (2024). Multilayered Trusted and Secure Surveillance with Frame Encoding, ML, and Hashgraph.

Živić, N., Kadušić, E., & Kadušić, K. (2020). Directed Acyclic Graph as Hashgraph: An Alternative DLT to Blockchains and Tangles.

Tessone, C. J., Tasca, P., & Iannelli, F. (2024). Stochastic Modelling of Blockchain Consensus.

Alahmad, M., Alshaikhli, I., Alkandari, A., AlShehab, A., Islam, M. R., & Alnasheet, M. (2022). Influence of Hedera Hashgraph Over Blockchain.

Platt, M., Sedlmeir, J., Platt, D., Xu, J., Tasca, P., Vadgama, N., & Ibañez, J. I. (2021). Energy Footprint of Blockchain Consensus Mechanisms Beyond Proof-of-Work.

Chbaik, N., Khiat, A., Bahnasse, A., & Ouajji, H. (2024). Blockchain-Assisted IoT Wireless Framework for Equipment Monitoring in Smart Supply Chain: A Focus on Temperature and Humidity Sensing.

Hedera. (2024). What is Hedera Hashgraph? Retrieved from https://hedera.com.

Nikolaou, D., & Anthopoulos, L. (2024). Towards an ITU Standard for DLT Energy Consumption.

Douaioui, K., Oucheikh, R., & Mabroukil, C. (2024). Blockchain-IIoT Integration: Revolutionizing Smart Manufacturing Process Monitoring.

Lamriji, Y., Kasri, M., El Makkaoui, K., & Beni-Hssane, A. (2023). Comparative Study of Consensus Algorithms for Blockchain.

Chaabane, A., Hnaien, F., Larbi, R., & Bahria, N. L'Internet industriel des objets (IIoT) dans la gestion de la chaîne d'approvisionnement: Transformer les opérations pour le future. International Journal of Operations & Production Management.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Les éléments déclencheurs de la Co-transformation organisationnelle et digitale suivant une approche PLM et PPR

***Résumé* – Les projets de co-transformation organisationnelle et numérique sont très exigeants et les pratiques actuelles pour relever ces défis sont encore limitées en termes d'efficacité et d'efficience. Il est donc nécessaire de disposer d'outils méthodologiques de support à la décision innovants pour aider les responsables à mener de tels projets de manière optimale. Cette communication présente les résultats d'une recherche bibliographique initiale, comprenant une étude des fondements théoriques et un travail préliminaire sur l'identification des déclencheurs d'un tel programme de transformation. Ce travail vise à définir les premiers éléments du Framework qui sera utilisé pour soutenir la co-transformation organisationnelle et numérique basée sur les approches PLM et PPR.**

CYRIL AMERGÉ[1,2], FAROUK BELKADI[1], MICHEL PAILLET[2], FLORENT LAROCHE[1]

[1] Nantes Université, École Centrale Nantes, CNRS, LS2N, UMR 6004
F-44000 Nantes, France
prenom.nom@ec-nantes.fr
[2] Efeso
117 avenue des Champs Élysées, 75008 Paris, France
prenom.nom@efeso.com

Abstract – Organizational and digital co-transformation projects are highly challenging and the current practices against these challenges are still limited in terms of efficiency and effectiveness. This is leading to the need of innovative decision supports to help managers conducting such strategies in optimal way. This paper summarizes the results of an initial exploratory phase, involving a study of the theoretical foundations and a preliminary work on the identification of triggers of such transformation program. This work aims to define the first components of the framework that will be used to support organizational and digital co-transformation based on PLM and PPR approaches.

***Mots clés* – transformation organisationnelle, co-évolution, approche PLM, PPR, déclencheurs de transformation.**
***Keywords* – organizational transformation, co-evolution, PLM approach, PPR (Product, Processus Resources), transformation triggers.**

1 CONTEXTE DE LA RECHERCHE

Les entreprises évoluent dans un marché de plus en plus concurrentiel, contraint par une variété d'exigences normatives et des changements rapides de l'environnement socio-économique. Pour faire face à ces évolutions, les entreprises d'aujourd'hui restructurent constamment leurs processus internes et améliorent leurs ressources matérielles et humaines afin d'accroître leur résilience et leur agilité. Proposer de nouvelles offres de produits et/ou de services implique de nouvelles transformations organisationnelles au niveau de l'ensemble de la chaine de création de la valeur, mais aussi de la chaîne d'approvisionnement globale et des relations avec les clients.

Pour certains projets complexes, les entreprises doivent établir des collaborations dynamiques et contextuelles avec divers partenaires et à différents niveaux d'intégration. De nouvelles activités transactionnelles apparaissent et entrainent des modifications des processus internes de chaque partenaire. La gestion de la pluralité des processus impactés devient particulièrement complexe lorsque les partenaires, fournisseurs, décident d'avoir des degrés d'intégration différents en fonction des projets : intégration très forte sur certains projets et très faible sur d'autres. Le succès d'une relation contractuelle exige le meilleur compromis entre les exigences de toutes les parties prenantes et une adaptabilité de l'intégration au cours du projet. Les méthodes conventionnelles de mise en place de telles relations tendent à figer la définition de la stratégie d'intégration aux premiers stades de développement du projet. En conséquence, la variabilité et les degrés de liberté des partenaires deviennent limités en fonction du degré d'intégration mutuelle.

D'autre part, le besoin de structurer et de synchroniser les processus va de pair avec le besoin de partager informations et connaissances via la chaine numérique composée de multiples logiciels et systèmes d'information interconnectés. Avec l'émergence du paradigme d'Industrie 4.0, le concept de chaine numérique intègre diverses technologies telles que l'IoT (Internet des Objets), le cloud, les jumeaux numériques et autres outils de réalité augmentée ou virtuelle.

De plus, comme le décrivent certains consultants, l'observation des pratiques industrielles pour accompagner la co-transformation numérique et organisationnelle semble plus opportuniste et empirique que de relever d'une méthodologie structurée voire d'un standard établi. Au niveau opérationnel, cette faiblesse entraine de sérieuses difficultés dans

l'articulation entre les différentes approches managériales telles que la gestion de programme, l'ingénierie des systèmes, la gestion du cycle de vie des produits, la gestion de configuration, etc.

Avec les hypothèses énoncées ci-dessus, le déploiement d'une approche de transformation numérique est complexe à mettre en œuvre et nécessite une cartographie préalable des processus et des ressources. Ainsi la transformation organisationnelle a un impact direct sur la transformation numérique. Inversement la transformation organisationnelle est fortement contrainte par les capacités réelles des ressources humaines et numériques de l'entreprise. Il est donc primordial de penser stratégie de « co-transformation » plutôt que de transformations individuelles pour assurer la cohérence de l'ensemble de la chaine de valeur et de la chaine numérique associée.

La collaboration entre Cognitive Companions - société de conseil spécialisée dans la transformation organisationnelle et numérique membre du groupe Efeso – avec le laboratoire LS2N prend la forme d'un travail de recherche avec le support d'une thèse CIFRE. L'objectif est de développer une nouvelle approche d'aide au management qui s'appuie sur les normes, méthodes et pratiques existantes pour soutenir les besoins émergents de « coévolution », tout en favorisant l'agilité organisationnelle et la performance opérationnelle.

Cet article se concentre sur la phase d'exploration et propose une synthèse de la littérature pour expliquer les raisons et les contextes principaux qui conduisent au besoin de transformation organisationnelle. Dans un deuxième temps, une vue d'ensemble des méthodes et outils qui peuvent être actionnés pour supporter de tels programmes sera donnée. Ensuite les premiers résultats de cette recherche sous la forme de matrices reliant les éléments déclencheurs des programmes de transformation, les besoins liés à cette transformation et les leviers à activer seront présentés. En perspective les futures étapes de construction du Framework seront présentées.

2 ÉTAT DES LIEUX INDUSTRIELS : QUELS SONT LES ELEMENTS DECLENCHEURS D'UNE CO-TRANSFORMATION ?

Se lancer dans un projet de transformation organisationnelle est une décision risquée et coûteuse qui doit être envisagée avec beaucoup de précaution car elle peut aboutir à une déstabilisation complète de l'entreprise. Dans ce contexte les conséquences de retards ou de surcoûts dans ces projets peuvent impacter négativement la performance de l'entreprise. De plus, la résistance au changement peut apparaitre en interne et augmenter la probabilité d'échec du projet. Il est ainsi important de bien analyser les rapports bénéfices / pertes et forces / faiblesses avant de lancer des projets de cette ambition. Dans cette partie nous allons aborder quelques exemples de stratégies bénéfiques nécessitant une transformation organisationnelle.

2.1 Changer de modèle d'affaire (business model)

Les entreprises font constamment face à la concurrence, ce qui les oblige à rechercher des nouvelles opportunités commerciales et de nouveaux moyens de créer de la valeur. Le modèle de systèmes Produit-Services (PSS : Product Services Systems) est un exemple de stratégie utilisable où l'idée est de créer une valeur complémentaire en fournissant un système intégré de produits et de services tout au long de leur cycle de vie et répondant aux exigences des clients tout en diminuant la consommation de ressources et l'impact sur l'environnement [Brady et al., 2005]. Le PSS n'est pas une simple addition de composants et de services distincts, mais une combinaison de processus complexes pour la définition, l'assemblage et l'intégration de composants mécaniques, cyber-physiques et IoT, mais aussi d'infrastructures organisationnelles et numériques [Andriankaja et al., 2016]. Trois caractéristiques principales des PSS peuvent justifier d'apporter des changements majeurs à l'organisation des entreprises.

Premièrement, la valeur du PSS est obtenue grâce à une relation à long terme avec le client tout au long du cycle de vie du PSS. Dans les cas où le PSS est centré sur l'usage ou les résultats, le produit reste la propriété de l'entreprise, contrairement au modèle commercial classique. Dans ce cas elle est responsable du maintien du produit en conditions opérationnelles et de sa mise à jour lors de l'apparition de nouvelles technologies ou normes, ainsi que de la gestion de sa fin de vie. De nouvelles compétences, de nouveaux rôles et processus sont nécessaires pour accompagner cette transformation du modèle d'entreprise, *par exemple dans le cas d'un service de partage de vélos, il est nécessaire d'avoir un service de transport pour assurer la bonne répartition des vélos dans les stations.*

Deuxièmement, l'objectif du PSS est d'améliorer l'expérience utilisateur du client par l'ajout d'offres complémentaires. Cela est possible grâce aux infrastructures numériques qui permettent d'analyser les comportements clients, afin de fournir le bon service, ou l'état des produits, par exemple des capteurs permettent d'analyser le comportement du système et de prédire les défaillances potentielles [Maleki et al., 2018].

Des ressources et compétences numériques sont alors nécessaires pour effectuer la collecte et le traitement des données dans diverses perspectives d'aide à la décision.

Troisièmement, le processus de développement des PSS implique des parties prenantes hétérogènes aux compétences et ressources complémentaires qui doivent travailler en étroite collaboration. Même si les entreprises ont l'intention de tirer de grands avantages concurrentiels avec ces offres PSS, elles ne sont pas prêtes ou capables d'intégrer les compétences de base pour couvrir tous les domaines requis par de tels projets de développement [Wallin et al., 2015]. *Un exemple concret de PSS est celui de chaussures intelligentes permettant de détecter les accidents domestiques ou sur le lieu de travail ainsi que la fatigue des travailleurs. Dans ce cas, le fabricant de chaussures fait appel à d'autres entreprises spécialisées dans l'électronique et les systèmes de détection pour installer les bons dispositifs. Cet effort de collaboration est également nécessaire pendant les phases d'exploitation et de mise à jour pour rendre le service attendu.* La question de la transformation organisationnelle est alors étendue à la sélection des meilleurs partenaires et à l'évaluation de la performance de la collaboration entre les potentiels partenaires [Harrat et al., 2023].

2.2 Frugalité et régionalisation des marchés

L'innovation frugale est une autre stratégie permettant de se développer sur des nouveaux marchés ou segments de marché. « Frugal » est un acronyme anglais agrégeant six attributs : Functional, Robust, User-friendly, Growing, Affordable and Local [Berger, 2013]. Cette théorie a été introduite pour proposer de nouvelles orientations afin de soutenir l'évolution des stratégies des entreprises industrielles lorsqu'elles proposent de nouveaux produits destinés à des marchés régionaux [Zeschy et al., 2011]. Les résultats d'un processus frugal sont des nouveaux produits ou services qui « cherchent à minimiser l'utilisation de ressources dans l'ensemble de la chaine de valeur avec l'objectif de réduire le coût de propriété tout en remplissant ou excédant les exigences prédéfinis de standard de qualité acceptable » [Tiwari et Herstatt, 2012].

L'attribut « abordable » ne signifie pas que l'innovation frugale est une approche uniquement de bas coût (Low-cost) dont l'objectif est la réduction du prix au risque de réduire les fonctionnalités ou en choisissant des composants très bon marché délaissant donc la qualité. Cette approche se concentre plus sur le fait de fournir des produits et des services qui répondent aux besoins exacts des clients à un coût acceptable en fonction du contexte socio-économique de la cible dans le marché régional choisi. De même, l'attribut local suggère de mieux prendre en compte les capacités, exigences et contraintes existantes sur le marché local afin d'optimiser les performances de production. Cela doit être fait avec le respect des spécificités culturelles, sociales, légales et des standards de qualité et d'utilisation locaux qui sont très variables en fonction des régions [Belkadi et al., 2018].

La stratégie visant à se concentrer sur les avancées technologiques en tant que source d'innovation et à développer des produits en partant de zéro n'est pas le meilleur chemin pour atteindre un niveau de performance et de frugalité. La réutilisation et l'adaptation de solutions existantes, ayant prouvé leur efficacité dans des projets antérieurs, est un axe essentiel pour gagner du temps et de l'argent grâce à l'exploitation intelligente des connaissances [Giovanni et al., 2016].

Pour compléter la stratégie décrite ci-dessus, il est important de prendre en compte dans les processus de développement et de production les perspectives de personnalisation de masse, complète ou à la demande [Daaboul J. et al., 2011]. Ceci permet de donner au client la possibilité de personnaliser leur commande en fonction de leurs préférences et de leur capacité financière [Shao, 2020].

Cette stratégie nécessite d'adapter les systèmes productifs aux capacités du marché cible, aux contraintes de la chaine d'approvisionnement et aux contraintes locales. De plus si l'entreprise souhaite proposer une grande variété de produits sur le même marché il devient nécessaire d'avoir un réseau de production flexible.

La frugalité et la personnalisation de masse / complète conduisent à une transformation organisationnelle qui vise à renouveler les processus internes et à construire un réseau de fournisseurs pour la réalisation et la gestion d'une grande variété de produits et d'offres de services. Pour assurer la réponse adéquate du réseau de fournisseurs il est nécessaire d'aligner les systèmes d'information des différents acteurs de ce réseau. Cela entraine tout naturellement un besoin de transformation numérique pour accompagner la transformation organisationnelle.

2.3 Développement de la résilience

Au contraire des deux précédentes stratégies, qui sont en général bien définies et planifiées en fonction des caractéristiques du marché adressé, la résilience consiste à être capable d'anticiper et de répondre à diverses situations difficiles, et nécessite donc une grande réactivité de la part des organisations.

L'objectif de la résilience n'est pas de s'opposer aux événements négatifs, mais d'en minimiser les impacts sur la performance globale. La résilience physique, par exemple, est la capacité d'un objet à revenir à son état initial après une perturbation particulière. Dans le domaine industriel, la résilience fait référence aux capacités des ressources et processus internes à mettre en œuvre des scenarii alternatifs et proactifs pour répondre à des situations particulières. La fabrication décentralisée (DM pour Decentralized Manufacturing) est un type de stratégie visant à accroître la résilience des entreprises d'aujourd'hui [Leng et al., 2023]. Il s'agit d'un paradigme selon lequel une coopération est organisée entre des entreprises réparties géographiquement au sein d'un réseau de production coopératif dont les membres sont autonomes, conscients des finalités et capables de prendre des décisions locales. De même, la résilience en approvisionnement est la capacité de la SC (Supply Chain) d'être prête à réagir à toute situation imprévue, de répondre à toute rupture de cette chaine, et de rétablir la chaine après une rupture. Elle repose sur trois aspects : la réactivité, la réponse et le rétablissement (RRR : Readiness, Respond and Recovery en anglais). La réactivité correspond à la capacité d'être préparé à tout événement imprévu à l'aide de plans proactifs. La réponse est la capacité à faire face aux perturbations de la SC, quant au rétablissement il correspond à la capacité de réorganiser et reconcevoir la chaine d'approvisionnement pour revenir à un état initial. [Qader et al., 2022].

2.4 La transformation du consommateur en consommacteur

Le business model a changé, d'une approche centrée sur les entreprises et leurs offres vers une approche centrée sur les consommateurs et leurs besoins, et désirs ainsi que la coopération avec eux [Szul E., 2023]. Les consommateurs ne souhaitent plus être de simples utilisateurs passifs des offres proposées, ils veulent également pouvoir participer à la création de la valeur pour leur permettre d'obtenir des produits/services qui répondent à leurs besoins et leurs envies. C'est une des raisons pour lesquelles les entreprises doivent se transformer pour être capables de travailler dans ces nouveaux modes coopératifs. Les processus de conception, de production et de vente sont donc impactés par ce phénomène. Eriksson, établit que les organisations peuvent être créatrices de valeur, mais que finalement ce sont les consommateurs qui créent de la valeur au travers de leurs interactions avec l'entreprise [Eriksson K., 2022]. Toutes ces interactions, tout comme l'intégration des consommacteurs dans l'organisation et ses processus sont autant de sources de transformation aux impacts multiples.

Le cas de la consommaction dans le cadre de l'énergie est un exemple très particulier qui présente de nombreux challenges techniques et organisationnels. L'autoconsommation d'électricité consiste à consommer tout ou partie de l'électricité produite par un consommateur, cette production est majoritairement d'origine renouvelable mais peut être issue de système de co-génération, des 'chaudières' produisant simultanément de la chaleur et de l'électricité. Cette production peut être individuelle ou collective. Les challenges à adresser par les sociétés commercialisatrices ou productrices d'énergie et de services à l'énergie sont alors multiples. Le premier est d'ordre économique avec la potentielle perte de parts de marché. Des variations de prix en relation avec l'équilibre entre la production d'électricité et la demande peuvent aboutir à des prix négatifs de l'électricité. La littérature académique sur ce sujet traite majoritairement des challenges techniques liés à l'équilibrage des grilles locales. Les énergéticiens doivent aussi faire évoluer leurs offres pour prendre en compte ces nouvelles formes de consommations et ces nouvelles attentes des clients. Ainsi la gestion de l'autoconsommation et en particulier l'utilisation optimale de l'énergie produite dans le cadre de la production collective par co-génération induit la mise en place de nouvelles offres et de nouveaux services avec une relation accrues avec les clients pour répondre à leurs attentes. Cette autoproduction a aussi des impacts sur les réseaux de distribution en particulier dans le cas de production basée sur

des énergies renouvelables qui sont soumises à une intermittence. Les questions d'équilibrage des réseaux, de gestion des revenus issus de la production sont des difficultés à gérer et complexifient la gestion opérationnelle des réseaux. Cette autoproduction présente également des opportunités pour supporter à l'échelle locale le challenge de l'intermittence et de la réponse aux pics de consommations [Brown et al., 2019], faisant de ces consommacteurs des éléments clés de réponse. En modulant leur consommation à l'aide de la réduction de la consommation ou du stockage de l'énergie ils permettent de réduire les effets de l'intermittence ou des pics de consommations liés à la météo par exemple. Des offres vers les particuliers se développent et existent depuis plusieurs années pour les gros consommateurs professionnels. Les développements techniques assurant le contrôle des solutions de production (Smart Metering, IoT), ainsi que la généralisation des véhicules électriques sont des éléments facilitateurs de cette transition. Toutes ces opportunités ont donc des impacts en termes d'organisation, de gestion de la relation avec les consommacteurs, et en termes techniques, et vont nécessiter une adaptation de l'organisation, des processus et des outils permettant de gérer les réseaux électriques de bout en bout. Ils s'appuient sur des solutions numériques d'aide à la décision et de support aux utilisateurs. La prise en compte de la relation accrue avec les producteurs locaux d'énergie est également un fort enjeu de cette transformation des business model.

3 ÉTAT DES LIEUX SCIENTIFIQUE : SUPPORTS METHODOLOGIQUES ET INFORMATIONNELS POUR LA TRANSFORMATION ORGANISATIONNELLE

3.1 Stratégie de co-évolution et approche PPR

Une solution pour réaliser une transformation organisationnelle efficace consiste à concevoir différents scenarii alternatifs en fonction de la spécificité des situations. Ces scenarii doivent être contraints par les capacités et les ressources internes et adaptés aux spécificités des variantes de produits et à la stratégie définies pour l'entreprise. En conséquence la coévolution des produits, des processus et des systèmes de production et la prise en compte de leurs influences réciproques avec les décisions stratégiques de l'entreprise sont nécessaires pour atteindre la durabilité économique et sociale dans ce contexte de transformation.

Dans ce cas, la propagation du changement se comporte comme une vague de cause à effet à travers l'entreprise couvrant toutes les dimensions du produit, des processus et du système de production. Selon [Tolio et al., 2020], le terme « coévolution » représente la capacité à gérer stratégiquement et opérationnellement la propagation des changements techniques afin de tirer un avantage concurrentiel de la dynamique des marchés ainsi que des réglementations. La coévolution du système de production est généralement étendue au niveau du réseau de production qui vise à créer plusieurs relations de collaboration entre les fabricants (OEM pour Original Equipment Manufacturer) et leurs fournisseurs pour une meilleure gestion des compétences et des ressources dans l'ensemble du processus de production. La sélection et l'évaluation des fournisseurs est alors l'un des facteurs clés à résoudre dès le départ pour garantir la réussite de toute collaboration entre OEM et fournisseurs [Cheraghi et al., 2004].

Pour réaliser une stratégie de coévolution efficace, il est important de travailler conjointement sur la conception de structures Produit-Processus-Ressources (PPR). L'approche PPR est souvent utilisée comme cadre conceptuel pour soutenir la conception et le déploiement de systèmes d'information dans le cadre de l'approche PLM (Product Lifecycle Management, gestion du cycle de vie des produits). Cependant l'application de cette approche est toujours limitée par plusieurs aspects qui doivent être résolus :

- La gestion de configuration ne prend pas systématiquement en compte toutes les vues sur les objets métiers. C'est une conséquence du problème de l'incohérence des données, lorsque les données représentatives de chaque vue sont gérées par des sources différentes et des formats hétérogènes, potentiellement avec des différences sémantiques.
- La cartographie des processus est souvent réalisée, sous la forme de formalisation des procédures internes. Les pratiques quotidiennes et les interactions dans les situations de travail réelles ne sont pas suffisamment prises en compte dans les modèles de soutien à l'agilité.
- Les ressources utilisées sont souvent considérées de manière quantitative lors de la planification. Les niveaux de compétences individuels et collectifs (issus de communautés de pratique par exemple) ne sont que partiellement pris en compte. En outre peu d'outils font la distinction entre les profils novices et experts lorsqu'ils fournissent des informations /connaissances utiles dans les fonctions d'aide à la décision.

Ainsi, toute stratégie de coévolution devrait reposer sur des modèles robustes garantissant la cohérence globale entre toutes les étapes de la transformation (de la définition de ses objectifs à son implémentation avec sa mise sous contrôle) et soutenant la propagation des décisions à tous les niveaux managériaux de l'entreprise. La puissance de la modularité pour de telles problématiques est clairement exposée dans la littérature [Saki, 2005], puisqu'elle consiste à décomposer des systèmes complexes en parties indépendantes mais interconnectées pouvant être traitées comme des unités conceptuelles, logiques, physiques ou organisationnelles/opérationnelles [Jiao et Tseng, 2000].

3.2 Modularité et gestion de configuration

L'architecture produit est la manière dont les fonctions d'un produit sont organisées en unités physiques et la manière dont ces unités interagissent pour mettre en œuvre ces fonctions [Ulrich et Eppinger, 2004]. Ce concept est étroitement lié à celui de module, qui représente un regroupement physique ou conceptuel de composants du produit pour former une unité cohérente facilement identifiable et remplaçable. Sur la base de ce concept de modularité [Hubka et Eder, 1998] définissent le processus de conception modulaire comme « connecter les éléments de production en des groupes appropriés à partir desquels de nombreuses variantes de systèmes techniques peuvent être assemblées ».

Le résultat de ce processus est une architecture générique du produit (GPA : General Product Architecture), susceptible de permettre de réaliser des économies et de créer rapidement de multiples variantes du produit, grâce aux concepts de famille de produits et de mécanismes de configuration [ElMaraghy et al., 2013]. L'ensemble de la structure du produit est obtenu par la spécification des interfaces des modules. La GPA peut être construite en utilisant une méthodologie globale : décomposer le système en modules discrets ; assurer l'interchangeabilité des modules avec d'autres, et fournir des interfaces bien définies entre les modules dans la GPA ciblée. Ainsi la

modularisation consiste à décider des caractéristiques utilisées pour regrouper et de celles utilisées pour séparer différents composants dans un module.
En transposant ce concept de module de produit à différents éléments pris en compte dans les projets de transformations organisationnelles (tels que les processus et ressources par exemple) plusieurs piliers d'amélioration peuvent être déployés. Nous pouvons ainsi utiliser les outils gérant le cycle de vie d'un produit, considéré comme un système complexe, pour gérer le cycle de transformation d'une organisation qui est lui-même un système complexe. Les composantes de ce système « organisation » sont alors de l'ordre des ressources, processus, exigences, réglementation, mais relèvent également des finalités, culture et des contraintes extérieures, cette liste n'étant pas exhaustive. À titre d'exemple une attention peut être portée sur les processus afin d'illustrer ce concept. Dans ce cas les processus seraient complétement définis avec leurs finalités spécifiées, les ressources nécessaires pour les exécuter identifiées aussi bien d'un point de vue quantitatif que qualitatif, et l'ensemble des interfaces de ces processus décrites. Tous ces éléments seraient gérés en configuration, tout comme les composants des modules produit.

3.3 L'approche PLM en tant que support de la transformation organisationnelle

La transformation organisationnelle exige de profonds changements dans les processus opérationnels, tant au niveau interne qu'externe. Ces processus sont généralement synchrones, échangent des ensembles hétérogènes de données et d'informations et partagent diverses ressources.
Au niveau externe, l'organisation virtuelle (VO : Virtual Organization) et l'entreprise étendue (EE : Extended Enterprise) sont les principales catégories d'organisations en réseau (NO : Networked Organizations) capables de fournir de nouveaux processus de travail, rôles et modèles de collaboration entre les entreprises [Kamel et al., 2007]. Les nouvelles règles et contraintes sont décrites sous la forme d'un ensemble d'accords implicites ou contractuels entre les membres du réseau afin d'éviter les conflits d'intérêts aux niveaux managériaux ainsi que les conflits entre les ressources et les processus aux niveaux opérationnels. Les règles et les procédures des organisations en réseaux doivent garantir la flexibilité pour la mise en œuvre des processus d'ingénierie et métier pour faire face aux changements de l'environnement économique. Cela permettra à chaque partenaire de collaborer sur certains projets tout en restant indépendant sur d'autres.
Si l'on considère le PLM comme une approche (et non comme un simple outil), il est prouvé que ce paradigme présente de grands avantages pour l'implémentation de ce type de règles de coordination à différents niveaux de la collaboration inter-entreprises [Ming et al., 2005]. En effet, le PLM est défini comme un concept systématique pour la gestion intégrée de toutes les données et de tous les processus liés aux produits tout au long de leur cycle de vie. Il peut être assimilé à une stratégie intelligente qui applique de manière cohérente divers modèles de processus et solutions informatiques pour supporter la création, la gestion et l'utilisation des informations sur les produits dans l'ensemble de l'entreprise étendue. Dans l'industrie manufacturière, le PLM repousse les limites des outils de gestion des données produits (PDM : Product Data Management) et résulte de l'intégration de systèmes d'informations commerciaux hétérogènes [Schuh et al., 2008]. De plus, à l'aide des panneaux de configuration, le PLM permet d'assurer une stratégie de partage des données en fonction des caractéristiques des processus de collaboration. La logique principale est qu'un niveau de collaboration plus élevé implique une connexion plus forte entre les processus internes et les systèmes informatiques mettant en œuvre l'approche PLM. En d'autres termes, on peut confirmer que le PLM est un support idéal pour la co-transformation numérique et organisationnelle dans l'entreprise.
Comme évoqué plus haut, si nous assimilons le système « Organisation » à un système « Produit », et que nous lui appliquons l'approche PLM en gérant toutes les données décrivant l'organisation, ses finalités, ses exigences, ses produits, processus et ressources, ainsi que les processus permettant de la transformer nous sommes en présence d'un outil méthodologique permettant de décrire complétement l'état actuel de l'organisation, l'état cible de celle-ci ainsi que la trajectoire pour l'atteindre. Dans cette hypothèse les processus propres à la transformation seront également décrits.

4 PROPOSITION SCIENTIFIQUE : CLASSIFICATION DU CONTEXTE ET DES EXIGENCES DE LA TRANSFORMATION ORGANISATIONNELLE

Dans la seconde partie, nous avons abordé quelques exemples de déclencheurs de la co-transformation organisationnelle et numérique des entreprises. Ces exemples ne sont pas exhaustifs. Cependant la nature de ces éléments initiateurs de la transformation sont primordiaux pour identifier la portée des actions induites ainsi que pour identifier toutes les composantes de l'organisation qui seront impactées par cette transformation. Une revue bibliographique a été réalisée pour identifier quels sont les éléments à l'origine de ces projets de transformation. Cette revue s'est faite en deux temps : une première phase a été d'identifier ces déclencheurs en se basant sur l'expérience acquise au sein du cabinet de conseil dont deux co-auteurs sont membres, la seconde phase a porté sur la recherche bibliographique pour déterminer quels sont les raisons et les besoins impliqués par les déclencheurs ainsi que les leviers à actionner afin d'assurer la réussite du programme de transformation.
Nous faisons ici le parallèle avec les démarches d'adoption d'innovations dans les méthodes de management. Comme décrit dans [Berkani et al., 2019], ce processus passe par trois phases : l'initiation, la décision et l'implémentation.

Figure 1 : Le modèle d'adoption de méthode innovante en 3 phases

1. L'initiation : dans cette phase une méthode managériale innovante est identifiée, son adéquation avec les besoins de l'organisation est alors évaluée et communiquée. Dans le cas de la transformation organisationnelle, cela peut être mis en regard de l'identification d'un besoin de transformation.
2. La décision : en fonction de l'évaluation faite pendant la phase précédente, la décision de l'adoption de cette méthode est prise. Dans le cas présenté ici, il s'agit de décider de la portée du projet de transformation et d'identifier les besoins auxquels ce projet devra répondre.
3. L'implémentation : cette phase est composée de toutes les actions pertinentes pour préparer la mise en place de la méthode, et son déploiement au sein de

l'organisation, ainsi que sa généralisation. Dans le cas présenté cela a été la recherche des leviers d'actions qui sont à activer durant cette phase pour assurer le succès du projet de transformation.

Nous partons aussi de l'hypothèse que tout projet doit être défini dans le temps et doit avoir un objectif final mesurable. L'étude a été complétée avec la recherche de ce que nous avons appelé des « concepts associés » qui vont permettre de définir des indicateurs de suivi de la réussite du projet. Ces éléments vont être décrits ci-dessous.

Les déclencheurs sont les éléments à l'origine du projet de transformation. Ils peuvent être de deux natures :

- Déclencheurs endogènes : internes à l'organisation ils sont directement liés à la finalité du système « Organisation ». Un choix de changement de modèle managérial, un changement dans les méthodes de travail ou l'ouverture d'un nouveau marché peuvent être considérés comme faisant partie de ce type de déclencheurs.
- Déclencheurs exogènes : ils sont des réponses à des changements extérieurs au système « Organisation ». Bien que ces éléments ne soient pas initiés par l'entreprise, celle-ci doit les adresser pour pouvoir mettre en œuvre sa finalité. Des changements de réglementation, des événements systémiques tels que les pandémies ou les catastrophes naturelles, entrent dans cette catégorie. La transformation des comportements des clients fait également partie de ces déclencheurs exogènes.

A partir de ces éléments déclencheurs des besoins ont été identifiés. Ces éléments permettent de définir l'ensemble des problématiques qui devront être adressées lors de la phase d'implémentation. Le modèle développé contient également les leviers d'actions devant être activés, ce sont les éléments à adresser opérationnellement durant l'implémentation de la co-transformation numérique et organisationnelle. La différentiation entre leviers organisationnels et numériques a été faite dans le modèle pour des raisons de simplification, mais ils ne peuvent être considérés comme étant totalement séparés puisqu'ils sont fortement reliés. La mise en place d'un backbone PLM par exemple, qui peut s'apparenter à une transformation numérique, aura de vrais impacts sur les processus de l'entreprise et son organisation. Similairement, si une entreprise souhaite revoir la gestion de sa SC, cela a des implications sur les outils mis en œuvre et ainsi ce qui est une transformation organisationnelle nécessitera une transformation numérique de l'entreprise. De plus cette transformation organisationnelle ne sera possible que si les outils numériques en place la permettent. Le choix de différenciation est établi à partir de la nature du traitement de l'information : si l'information est traitée à l'aide d'outils relevant du système d'information il sera considéré que la transformation de ces outils et des processus associés relève du cadre de la transformation numérique. Si l'information est traitée par un humain, une organisation ou qu'il y a des impacts sur l'organisation elle-même il est considéré que cela relève de la transformation organisationnelle. Le modèle est présenté sous forme graphique dans la (*Figure 2*).

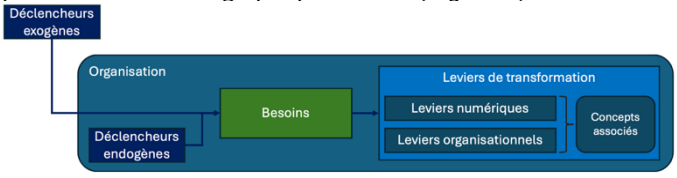


Figure 2 : Modèle Déclencheurs-Besoins-Leviers

Il est important d'identifier dans le cadre de la transformation les indicateurs de performance des processus métier de l'entreprise qui seront utilisés après la transformation dans les activités quotidiennes de celle-ci. Ces indicateurs devront être centrés sur la création de valeur en relation avec les finalités de l'organisation. De la même manière le projet de transformation devra lui-même faire l'objet d'une mesure de sa performance et de l'atteinte de ses objectifs. Le modèle proposé contiendra donc les outils pour définir ces indicateurs en se basant sur les « concepts associés » côté transformation et sur la création de valeur côté organisation.

Nous pouvons illustrer les relations existantes entre les différentes composantes du modèle proposé en utilisant un cas d'étude dérivé d'une des missions réalisées au sein du cabinet de conseil dont deux des auteurs font partie. Dans ce cas d'étude, le déclencheur est la décision d'étendre l'usage du PLM aux équipes en charge des achats et de l'approvisionnement pour un grand industriel français de l'automobile, cet outil étant au départ uniquement utilisé par les équipes de l'ingénierie. Dans ce contexte les besoins identifiés prennent plusieurs formes, le premier ensemble de besoins concerne la nécessité de favoriser la coopération entre les équipes et le besoin de modifier plusieurs processus des équipes d'ingénierie, d'approvisionnement et plus généralement de l'entreprise étendue. Le développement des outils permettant cette coopération devra naturellement prendre en compte les aspects de sécurité des données lors des échanges mais également dans les contrats de coopération avec les fournisseurs afin d'assurer la protection des actifs intellectuels et confidentiels : propriété intellectuelle, confidentialité des offres commerciales et techniques des fournisseurs par exemple. Les leviers à activer seront alors de deux natures. Les premiers leviers seront numériques avec l'intégration des membres des équipes d'approvisionnement dans les outils PLM ainsi que des fournisseurs afin de permettre de leur communiquer facilement les dernières versions des documents décrivant les pièces. Le déploiement d'outils permettant la collaboration au sein de l'entreprise étendue sera un autre levier à activer. Des règles de ségrégation de l'accès aux données seront un autre levier mis en place pour permettre d'assurer la confidentialité et la sécurité pour les données sensibles tout au long du cycle de vie du processus d'approvisionnement. En conjonction, des leviers organisationnels devront également être activés, des processus devront être modifiés pour favoriser la coopération entre les équipes et par exemple les processus de gestion des modifications côté ingénierie devront être modifiés pour permettre la propagation de ces changements de manière fluide vers les équipes d'approvisionnement et plus largement vers les fournisseurs afin de s'assurer que tous les intervenants travaillement bien sur la bonne version des documents. Par ailleurs si un fournisseur souhaite proposer une solution alternative répondant aux exigences de l'ingénierie, les processus de transmission et de validation de cette solution devront également être modifiés. L'interrelation entre les leviers numériques et organisationnels est ici illustrée. Le dernier élément du modèle est la notion de concept associé permettant de définir les indicateurs de suivi du projet de transformation. Parmi l'ensemble des concepts utilisables, nous allons en présenter trois ici. Le premier d'entre eux est le niveau d'intégration dans l'outil PLM pour lequel nous pouvons définir les indicateurs suivants :

- Ratio d'utilisateurs par rapport à une cible ou un volume total, en prenant en compte les équipes

internes ou l'ensemble des équipes de l'entreprise étendue.

- Des données de l'entreprise : intégration des données de l'ingénierie, de la production, dérivant les système productifs, des données d'approvisionnement ainsi que les contrats, toutes les données de la SC, ou toutes les données de l'entreprise…

Nous pouvons définir des indicateurs similaires en utilisant les concepts de niveau de collaboration, ou de niveau de performance de la chaine d'approvisionnement par exemple qui pourra comparer les délais, les coûts avant et après le projet de transformation.

5 PERSPECTIVES

L'objectif des travaux menés est d'obtenir un Framework pragmatique facilement utilisable dans le cadre de projet de transformation organisationnelle.

L'intégration des approches PLM et PPR se fait suivant le principe énoncé par J.L. Le Moigne dans [Le Moigne J.L. et Defourmy V., 1993] : « l'entreprise produit et se produit ». Ainsi l'entreprise est considérée comme étant un produit d'elle-même. Toutes ses composantes organisationnelles que ce soit ses processus, son organisation hiérarchique ou sa stratégie ainsi que la manière de la définir sont donc des produits et nous proposons d'appliquer les règles de gestion des changements et de traçabilité des données permettant de gérer les données propres à ce produit particulier qu'est l'organisation elle-même. Tous les éléments inclus dans l'approche PLM permettant de gérer tout le cycle de vie d'un produit depuis la définition de l'organisation et de ses exigences, à la gestion de sa mise en œuvre et de sa transformation seront mis sous le contrôle des outils PLM déployés. L'approche PPR sera quant à elle utilisée en tant que méta-modèle d'aide à la définition et au déploiement de l'organisation cible. Nous adresserons également la question que nous nous posons actuellement d'intégrer le « H » dans le méta-modèle pour prendre en compte le caractère particulier de la dimension humaine dans un tel dispositif, en effet cette « ressource humaine » présente des caractéristiques propres, niveau d'expertise, limites cognitives, résistance au changement..., qu'il est nécessaire de prendre en compte afin de réussir le projet de transformation.

Le modèle décrit dans cet article aboutit pour l'ensemble des déclencheurs identifiés à un cube de données dont certaines dimensions contiennent plusieurs centaines d'éléments. Un extrait du cube est donné à titre d'illustration dans la (Figure 3). Son utilisation dans le cadre de projet réel en est donc complexe pour des raisons cognitives. Les travaux à venir sont alors de deux natures.

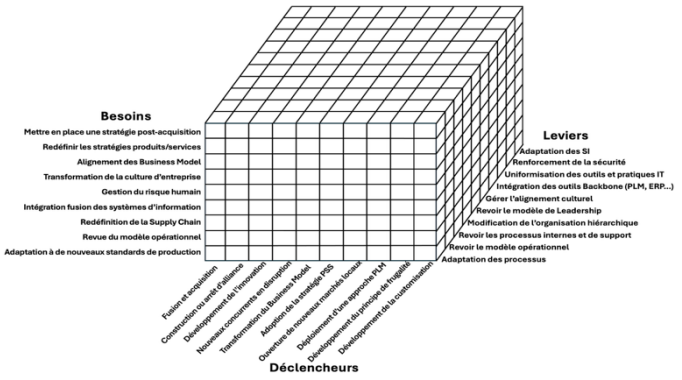


Figure 3 : Extrait du cube des déclencheurs, Besoins et des leviers

Dans un premier temps, le cube d'éléments sera séparé en deux tableaux : le premier, illustré dans la (Figure 4), mettra en relation les éléments déclencheurs avec les besoins liés. Un travail de factorisation de ces besoins sera également nécessaire pour faciliter l'utilisation de cet outil. Une fois cette factorisation réalisée, il sera alors possible de créer le deuxième tableau mettant en relation les besoins et les leviers d'action. Ce tableau, dont un exemple est donné (Figure 5), contiendra également les « concepts associés » ce qui permettra lors de l'implémentation de la transformation de mettre sous contrôle le projet de transformation et de définir les indicateurs pertinents de performance pour le projet. L'objectif est ici de créer les premiers outils permettant de définir le périmètre des éléments impactés.

Trigger	Adapt to new production standards	Operational model review	Supply chain review (redefinition and rationalization)	Integration of IT systems	HR risk management
Merge & acquisition	X	X	X	X	X
Alliance or partnership build or disengagement					
Innovation development		X		X	
Systemic event					X

Figure 4 : Exemple de tableau reliant les déclencheurs avec les besoins liés

	Levers of transformation									
	Organizational levers					Digital levers				Associated concepts
Needs	R&D process transformation	Production process transformation	Management process transformation	Core process transformation	Operational model review	Backbone tools integration	Uniformization of IT tools and practices	Cybersecurity reinforcement	Consolidation and rationalization of IT systems and infrastrucure	
Adapt to new production standards	X	X	X	X	X					TBD
Operational model review	X	X	X		X				X	TBD
Supply chain review		X			X					TBD
Integration of IT system	X	X	X	X		X	X	X	X	TBD
R&D processes transformation	X					X				TBD

Figure 5 : Exemple de tableau reliant les besoins liés et les leviers d'action

Dans un second temps, il sera utile de définir un méta-modèle des transformations en se basant sur le triptyque déclencheurs, besoins et leviers. Ce méta-modèle, par essence générique, pourra ensuite être décliné quelle que soit la nature du déclencheur et ainsi aura la possibilité d'adresser toutes les natures de transformations organisationnelles, y compris celles que nous n'avons pas étudiées. Pour aider à la constitution de ce méta-modèle, nous nous appuierons sur l'approche PPR décrite plus haut. Des outils tels que les Design Structure Matrix (DSM) et les Multi Domain Matrix (MDM) permettront de mettre en relation les composantes du triplet PPR initial avec la structure PPR finale, le résultat du projet de transformation. L'objectif serait ici d'obtenir une matrice de transformation qui permettra de mettre en relation les deux états :

$$PPR_{init} * T = PPR_{final}$$

Où PPR_{init} et PPR_{final} seront les états initiaux et finaux de l'organisation et T la matrice de transformation. Un modèle algébrique des transformations organisationnelles en sera déduit et permettra de rendre le modèle générique et applicable à tout type de transformation.

6 CONCLUSION

Les approches PPR et PLM sont des outils puissants qui permettent d'adresser la question de la transformation des organisations. Centrées sur la création de valeur ces approches permettent de décrire complétement les organisations, et les processus mis en œuvre au sein de celles-ci, mais également les processus qui prennent place lors de leur transformation. Le PLM en mettant sous contrôle toutes les données des entreprises permet de gérer ces données et de les diffuser auprès de toutes les parties prenantes qui en ont besoin.

Les premiers travaux décrits dans cet article constitueront les briques principales du Framework de support à la transformation tel que nous l'envisageons. Ces travaux s'appuient sur l'échange d'expérience entre le monde

académique et le monde du conseil ; il vise à enrichir de ces deux visions la construction du Framework pragmatique issu des pratiques construites durant ces vingt dernières années au sein du cabinet de conseil et en le renforçant par l'approche académique de tels sujets.

7 REMERCIEMENTS

Ces travaux de recherche font l'objet d'un financement par l'ANRT, Association Nationale de la Recherche et de la Technologie.

Nous tenons également à rendre hommage à Farouk Belkadi, qui nous a quitté avant la finalisation de cet article. Sa contribution à ces travaux a été précieuse, et nous lui en sommes profondément reconnaissants.

8 REFERENCES

Andriankaja H., Boucher X., Medini K., Vaillant H. (2016) A Framework to Design Integrated Product-Service Systems Based on the Extended Functional Analysis Approach. *Procedia CIRP, 47, pp. 323–328*.

Belkadi F., Colledani M., Urgo M., Bernard A;, Colombo G., Borzi G., Ascheri A. (2018) Modular design of production systems tailored to regional market requirements: A Frugal Innovation perspective. *IFAC PapersOnLine 51-11* 96–101

Berger, R. (2013). Frugal Products: Study Results. Stuttgart: *Berger Strategy Consultants http://www.rolandberger.com/media/pdf/Roland_Berger_Frugal_products_20130212.pdf*

Berkani A., Causse D., Thomas L., (2019), Triggers analysis of an agile transformation: The case of a central bank, *Procedia Computer Science 164 (2019) 449–456*

Brady, T., Davies, A., & Gann, D. M. (2005) Creating value by delivering integrated solutions. *International Journal of Project Management; 23(5), 360-365.*

Brown D., Hall S., Davis M., (2019) Prosumers in the post subsidy era: an exploration of new prosumer business models in the UK. *Energy Policy 135 110984*

Cheraghi S.H, Dadashzadeh M, Subramanian M. (2004) Critical Success Factors For Supplier Selection: An Update. *Journal of Applied Business Research; 20(2): 91-108.*

Daaboul J., Da Cunha C., Bernard A., Laroche F., (2011) Design for mass customization: Product variety vs. process variety. *CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2011, 60 (1), pp.169-174.*

ElMaraghy H, Schuh G, ElMaraghy W, Piller F, Schonsleben P, Tseng M, Bernard A., (2013) Product Variety Management. *CIRP Annals in Manufacturing Technology; 62(2): 629–652.*

Eriksson K., (2022) The drivers of prosumer innovativeness and its impact on value co-creation. *Industrial and Management Engineering, master's level Luleå University of Technology*

Giovannini, A., Aubry, A., Panetto, H., El-Haouzi, H., Canciglieri Junior, O. and Pierrel, L. (2016). "Knowledge representation, retrieval and reuse for product family design: An anti-logicist approach." *Computers & Industrial Engineering, 101: 391-402.*

Harrat M., Caverot G., Belkadi F., Bernard A. (2023) A Fuzzy logic assessment Framework for collaborative development of Product-Service Systems. *International Journal of Value Chain Management. Vol. 14, N°2, p.143 - 167.*

Hubka V, Eder E.W. (1998), Theory of technical systems. *2nd ed. Springer-Verlag.*

Jiao J, Tseng M.M. (2000) Fundamentals of product family architecture. *Integrated Manufacturing Systems; 11(7): 469 – 483.*

Kamel, M., A. Benzekri, F. Barrère, and R. Laborde. (2007) "Evaluating the Virtual Organizations Security Solutions Using the ISO/IEC 17799 Standard." *International Conference on Concurrent Enterprising, Sophia-Antipolis, June 4–6*

Lemoigne J-L, Defourmy V, (1993), "Dire l'entreprise, c'est la modéliser dans sa complexité". Communication & Organisation

Leng J., Zhong Y., Lin Z., Xu K., Mourtzis D., Zhou X., ... & Shen, W. (2023). Towards resilience in Industry 5.0: A decentralized autonomous manufacturing paradigm. Journal of Manufacturing Systems, 71, 95-114.

Maleki E., Belkadi F., Boli N., van der Zwaag B.J., Alexopoulos K., Koukas K., Marin-Perianu M., Bernard A., Mourtzis D. (2018) Ontology-based framework enabling smart Product-Service Systems: Application of sensing systems for machine health monitoring. *IEEE Journal Internet of things. Vol. 05, N° 06, p. 4496 – 4505.*

Ming, X. G., J. Q. Yan, W. F. Lu, and D. Ma. (2005). "Technology Solutions for Collaborative Product Life Cycle Management Status Review and Future Trend." Concurrent Engineering: Research and Applications 13 (4): 311–319.

Qader, G., Junaid, M., Abbas, Q., & Mubarik, M. S. (2022). Industry 4.0 enables supply chain resilience and supply chain performance. *Technological Forecasting and Social Change, 185, 122026.*

Sako M. (2005) Modularity and outsourcing: The nature of co-evolution of product architecture and Organisation architecture in the global automotive industry. *(Book chap) In: The business of systems integration. Oxford University Press, New York;. p. 229-253.*

Schuh, G., H. Rozenfeld, D. Assmus, and E. Zancul. (2008). "Process Oriented Framework to Support PLM Implementation." *Computers in Industry 59 (2–3): 210–218.*

Shao, X. F. (2020) What is the right production strategy for horizontally differentiated product: Standardization or mass customization?. *International Journal of Production Economics, 223, 107527.*

Szul E. (2023) Prosumerism of companies – opportunities and challenges in the consumers' opinion. *Social Inequalities and Economic Growth, no. 75*

Tiwari, R., Herstatt, C., *(2012)* Frugal Innovation: A Global Networks' Perspective. *Swiss Journal of Business Research and Practice, vol. 3, pp. 245-274.*

Tolio T., Ceglarek D., ElMaraghy H.A., Fischer A., Hu S.J., Laperrière L., Newman S.T., Váncza J. (2010) SPECIES: Co-Evolution of Products, Processes and Production Systems. *CIRP Annals – Manuf. Technology, 59 (2): 672–693.*

Ulrich K.T, Eppinger S.D. (2004), Product Design and Development, *McGraw-Hill. 3rd edition New York, NY.*

Wallin, J., V. Parida, and O. Isaksson, (2015): Understanding product-service system innovation capabilities development for manufacturing companies. *J. Manuf. Technol. Manag., 26, 763–787.*

Zeschky, M., Widenmayer, B., Gassmann, O., *(2011)* Frugal Innovation in Emerging markets: The case of Mettler Toledo. *Research Technology Management, vol. 54(4), pp. 38-45.*

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Stratégie de maintenance industrielle d'une ligne de production intégrant un jumeau numérique

KIMBERLEY VIARON[1], NATHALIE JULIEN[2], MOHAMMED ADEL HAMZAOUI[3]

[1] UNIVERSITÉ BRETAGNE SUD
LAB-STICC, UMR CNRS 6285
17 BD FLANDRES DUNKERQUE, 56100 LORIENT
kimberley.viaron@univ-ubs.fr

[2] UNIVERSITÉ BRETAGNE SUD
LAB-STICC, UMR CNRS 6285
17 BD FLANDRES DUNKERQUE, 56100 LORIENT
nathalie.julien@univ-ubs.fr

[3] UNIVERSITÉ BRETAGNE SUD
LAB-STICC, UMR CNRS 6285
17 BD FLANDRES DUNKERQUE, 56100 LORIENT
mohammed.hamzaoui@univ-ubs.fr

Résumé **– Les jumeaux numériques transforment la gestion industrielle en intégrant des capacités avancées d'analyse, de simulation et de prédiction. Le projet JUPITER (JUmeau numérique pour la Production Industrielle du TERritoire), appliqué à la plateforme SCAP (Systèmes Cyberphysiques Agiles pour la Production Industrielle), illustre cette évolution en structurant la maintenance en quatre niveaux : corrective, auto-maintenance, assistance au diagnostic et maintenance prédictive. L'approche développée permet d'optimiser la réactivité des interventions en exploitant un jumeau numérique adaptatif. D'abord, la maintenance corrective est améliorée par une reconfiguration dynamique des flux pour éviter les arrêts de production. Ensuite, l'auto-maintenance repose sur la formation immersive des opérateurs via la VR. L'assistance au diagnostic s'appuie sur un jumeau numérique collaboratif pour analyser les anomalies, avec des perspectives d'intégration de la réalité augmentée. Enfin, la maintenance prédictive, déjà partiellement déployée, utilise des capteurs associés à de l'intelligence artificielle pour anticiper les pannes et ajuster les processus en temps réel. À terme, le projet JUPITER vise un jumeau numérique collaboratif, pour une maintenance industrielle plus autonome et proactive.**

Abstract **– Digital twins are transforming industrial management by integrating advanced capabilities for analysis, simulation, and prediction. The JUPITER project (Digital Twin for Industrial Production of the Territory), applied to the SCAP platform (Agile Cyber-Physical Systems for Industrial Production), exemplifies this evolution by structuring maintenance into four levels: corrective maintenance, self-maintenance, diagnostic assistance, and predictive maintenance. This approach enhances the responsiveness of interventions by leveraging an adaptive digital twin.**

First, corrective maintenance is optimized through the dynamic reconfiguration of production flows to prevent downtime. Next, self-maintenance relies on immersive training for operators using virtual reality. Diagnostic assistance is supported by a collaborative digital twin to analyze anomalies, with prospects for integrating augmented reality. Finally, predictive maintenance, already partially implemented, utilizes sensors coupled with artificial intelligence to anticipate failures and adjust processes in real time. Ultimately, the JUPITER project aims to develop a collaborative digital twin to enable more autonomous and proactive industrial maintenance.

Mots clés **- Jumeau numérique, maintenance prédictive, réalité virtuelle, Industrie 4.0**

Keywords **– Digital Twin, predictive maintenance, virtual reality, Industry 4.0**

1 INTRODUCTION

La quatrième révolution industrielle, connue sous le nom d'Industrie 4.0, transforme profondément les systèmes de production et de logistique en intégrant des technologies numériques avancées. Parmi ces innovations, les jumeaux numériques se distinguent comme des outils clés permettant de modéliser, simuler et optimiser des systèmes complexes en temps réel. En reproduisant virtuellement des processus physiques, ils facilitent l'anticipation des dysfonctionnements**,** l'amélioration des performances et l'optimisation des flux, tout en renforçant la flexibilité et la résilience des systèmes industriels (Julien et al., 2021).

Depuis 2017, la recherche sur les jumeaux numériques appliqués à la maintenance a connu une forte croissance, en grande partie grâce à l'essor des technologies immersives. L'intégration de la réalité augmentée (AR) et de la réalité virtuelle (VR) depuis 2021 marque une avancée significative, transformant les jumeaux numériques en outils interactifs dédiés à l'aide au diagnostic et à la prise de décision en maintenance (Viaron, Julien & Hamzaoui, 2024).

En complément, la modélisation 3D interactive et la simulation en réalité virtuelle renforcent ces capacités en offrant une meilleure visualisation des flux et des interactions au sein d'environnements industriels complexes. L'association de ces technologies avec les jumeaux numériques ouvre ainsi la voie à des solutions avancées pour l'optimisation des processus, la maintenance des équipements et la formation des opérateurs, tout en facilitant l'identification précoce des anomalies (Ke et al., 2019).

Dans ce contexte, le projet JUPITER **(**JUmeau numérique pour la Production Industrielle du TERritoire) vise à démontrer comment les jumeaux numériques peuvent être utilisés pour optimiser la gestion des flux et améliorer la maintenance industrielle sur la plateforme SCAP **(**Systèmes Cyberphysiques Agiles pour la Production Industrielle**).** Située au sein de l'atelier productique de l'ENSIBS (École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Bretagne-Sud)**,** cette plateforme technologique dédiée à l'enseignement, la recherche et les transferts industriel repose sur une infrastructure de systèmes cyberphysiques connectés via le protocole Modbus, garantissant une synchronisation en temps réel entre les environnements physique et virtuel.

Figure 1: Plateforme SCAP

Le jumeau numérique JUPITER intègre également une plateforme de simulation immersive en VR (Virtual Reality), permettant d'analyser les flux de production, d'identifier **l**es zones critiques nécessitant des améliorations et d'explorer des scénarios alternatifs. Cette approche immersive joue un rôle central dans le développement de stratégies avancées de maintenance, en facilitant l'exploration des solutions correctives, la formation des opérateurs pour favoriser l'auto-maintenance et l'amélioration des interventions techniques.

L'un des défis majeurs des environnements industriels modernes est la gestion efficace de la maintenance, qui doit garantir la continuité des opérations tout en minimisant les interruptions et les coûts associés aux pannes. Traditionnellement, la maintenance repose sur des approches correctives et préventives, où les interventions sont déclenchées après la détection d'une anomalie ou selon un calendrier prédéfini. Toutefois, ces stratégies sont influencées par l'efficacité des inspections, qui peuvent être imparfaites, introduisant ainsi des incertitudes dans la prise de décision (Ulansky & Raza, 2024). Avec l'évolution des technologies numériques, une approche plus structurée et intelligente de la maintenance devient nécessaire

Selon Julien et Martin (2021), une approche structurée en quatre niveaux de maintenance permet une gestion optimisée des défaillances en combinant des capacités de reconfiguration dynamique, d'auto-maintenance, d'assistance au diagnostic et de maintenance prédictive. Cette approche repose sur les principes suivants :

- **Niveau 1 : Maintenance corrective et reconfiguration dynamique**. Consiste à réagir aux pannes en modifiant en temps réel les flux de production pour éviter l'arrêt total du système
- **Niveau 2 : Auto-maintenance et formation des opérateurs**. Utilise des modèles immersifs pour former les opérateurs à identifier et résoudre des anomalies de manière autonome.
- **Niveau 3 : Assistance au diagnostic**. Exploite les capacités du jumeau numérique et des outils interactifs pour guider les opérateurs dans l'identification et la résolution des pannes grâce à la télémaintenance.
- **Niveau 4 : Maintenance prédictive**. Permet d'intervenir avant l'apparition de la défaillance en anticipant les pannes via les modèles physiques basés sur des données en temps réel.

Cette stratégie de maintenance complète, applicable à toute ligne de production, vise à maximiser la continuité opérationnelle tout en intégrant des méthodes d'apprentissage et d'analyse immersive pour optimiser la prise de décision.

Dans cet article, nous présentons tout d'abord les caractéristiques et les capacités technologiques de la plateforme SCAP, avant d'examiner en détail chacun des quatre niveaux de maintenance et leur mise en œuvre à travers le jumeau numérique JUPITER. Chaque section sera consacrée à un niveau de maintenance, en analysant les méthodologies employées, les outils technologiques associés et les bénéfices industriels attendus.

Enfin, nous discuterons des avantages, des limites et des perspectives de cette approche dans le cadre de l'Industrie 4.0. Nous mettrons notamment en avant l'évolution du jumeau numérique en fonction des usages, soulignant comment son

apprentissage progressif et l'intégration de nouvelles données permettent d'affiner les stratégies de maintenance et d'optimiser en continu les performances industrielles.

2 MAINTENANCE CORRECTIVE ET RECONFIGURATION DYNAMIQUE

2.1 Définition et enjeux de la maintenance corrective

La maintenance corrective est historiquement la forme la plus répandue de maintenance industrielle. Elle consiste à intervenir après l'apparition d'un dysfonctionnement ou d'une panne, pour rétablir le fonctionnement normal du système. Si cette approche est simple à mettre en œuvre, elle présente plusieurs limites dans le contexte industriel moderne où les interruptions de production engendre des pertes financières et logistiques importantes.

Dans un environnement de production automatisé comme la plateforme SCAP, la maintenance corrective doit être repensée afin de minimiser les temps d'arrêt et garantir une continuité des opérations. C'est dans ce cadre que la reconfiguration dynamique entre en jeu. Dans le projet JUPITER, plutôt que d'attendre une intervention pour rétablir le fonctionnement habituel de la ligne, un jumeau numérique peut détecter la panne et proposer immédiatement des solutions alternatives pour éviter l'arrêt total du système.

2.2 Application du jumeau numérique à la reconfiguration dynamique

Dans le projet JUPITER, le jumeau numérique agit comme un système réactif, capable d'adapter la configuration de la ligne SCAP en temps réel pour réduire l'impact des pannes. La capacité du jumeau numérique à détecter les anomalies et à générer des alternatives repose sur une modélisation avancée des flux industriels. Negri et al. (2017) soulignent que ces outils permettent non seulement d'optimiser les processus, mais aussi de renforcer l'interaction entre le monde physique et numérique, rendant ainsi les systèmes de production plus flexibles et réactifs.

Ce processus repose sur plusieurs étapes :

1. Détection automatique de l'anomalie : le jumeau numérique identifie une variation anormale dans le système grâce aux capteurs connectés via Modbus et déclenche une alerte.
2. Génération de scénarios alternatifs : en s'appuyant sur la simulation des flux, le jumeau numérique propose une nouvelle organisation des opérations pour contourner le problème.
3. Mise en œuvre des solutions : sans nécessiter de validation humaine, les modifications de flux sont appliquées en temps réel pour garantir la continuité de production.

Par exemple, en cas de panne d'un convoyeur critique, le système peut rediriger les produits vers une autre ligne, modifier la séquence de certaines opérations, ou adapter les cadences des équipements en aval afin de limiter l'accumulation de produits en attente.

On retrouve ci-dessous dans la Figure 2 la méthodologie de reconfiguration :

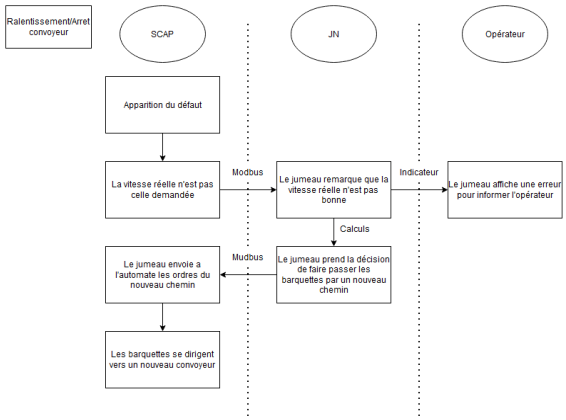


Figure 2 : Modélisation de la reconfiguration dynamique

2.3 Simulation immersive pour l'analyse des impacts

Bien que le jumeau numérique propose et applique automatiquement des solutions correctives, l'utilisation de la réalité virtuelle (VR) permet aux opérateurs d'analyser les conséquences des ajustements et d'anticiper d'éventuelles congestions ou nouvelles contraintes.

La simulation immersive joue ici un rôle d'aide au diagnostic :

- Elle visualise les flux modifiés en temps réel, permettant d'identifier si la reconfiguration engendre de nouveaux goulets d'étranglement.
- Elle permet de tester d'autres alternatives en simulation, sans impacter directement la ligne physique.
- Elle sert de support pour documenter les ajustements effectués et préparer des scénarios de reconfiguration optimisés pour de futurs incidents.

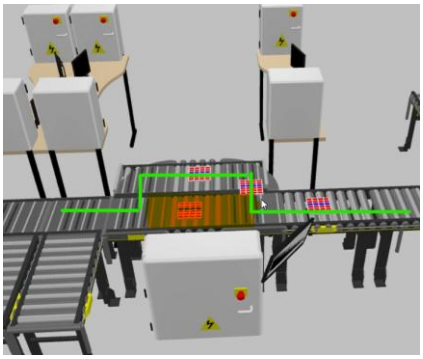


Figure 3 : Illustration d'un chemin alternatif

2.4 Bénéfices industriels de cette approche

L'intégration de la maintenance corrective avec reconfiguration dynamique dans le projet JUPITER apporte plusieurs bénéfices industriels tels que :

- Réduction du temps d'arrêt : la production ne s'interrompt pas complétement lors d'un dysfonctionnement, ce qui diminue les pertes de productivité
- Réactivité : le jumeau numérique agit instantanément en cas de panne, sans attendre une intervention.

- Optimisation continue : l'utilisation de la simulation immersive permet d'affiner les stratégies de reconfiguration, ce qui améliore la robustesse des processus industriels
- Focalisation des opérateurs : grâce aux ajustements autonomes du jumeau numérique, les équipes de maintenances peuvent davantage se concentrer sur des tâches à plus forte valeur ajoutée.

L'intégration du jumeau numérique JUPITER à la plateforme SCAP montre l'évolution de la maintenance corrective vers une approche plus agile, où la reconfiguration dynamique des flux joue un rôle important pour assurer la continuité de production. Toutefois, bien que cette approche limite les arrêts non planifiés, elle ne permet pas d'anticiper les pannes.

C'est dans cette optique que le niveau 2 de maintenance entre en jeu : l'auto-maintenance et la formation des opérateurs. L'objectif est d'aller au-delà de la simple correction des pannes en donnant aux techniciens les outils et les connaissances nécessaires pour intervenir de manière proactive sur les équipements.

3 AUTO-MAINTENANCE ET FORMATION DES OPÉRATEURS

3.1 Définition et enjeux de l'auto-maintenance

L'auto-maintenance, également appelée maintenance autonome, est une stratégie préventive qui repose sur l'implication des opérateurs dans la gestion des équipements afin de réduire les temps d'arrêt et d'améliorer la réactivité des interventions (Khan et al., 2020). Contrairement à la maintenance corrective, qui n'intervient que suite à une panne et nécessite souvent l'intervention d'un technicien spécialisé, l'auto-maintenance permet aux opérateurs d'identifier, analyser et résoudre directement des anomalies simples et clairement identifiées.
Selon Khan et al. (2020), cette approche repose sur trois principes clés :

1. Comprendre le fonctionnement des équipements pour mieux détecter les anomalies potentielles.
2. Identifier les causes des défaillances afin d'appliquer des actions correctives adaptées.
3. Intervenir rapidement pour éviter l'escalade des problèmes, en favorisant des réparations autonomes sur des pannes mineures.

Dans le cadre du projet JUPITER, l'auto-maintenance est facilitée par le jumeau numérique, qui joue un double rôle :

- Un outil de signalement : lorsque le système détecte une anomalie, un indicateur LED rouge clignotant avertit l'opérateur qu'une intervention est nécessaire.
- Un modèle immersif dédié à l'analyse post-intervention : bien que JUPITER ne soit pas directement utilisé pour guider l'opérateur en temps réel lors de l'auto-maintenance, il joue un rôle essentiel dans l'analyse et l'amélioration des procédures de maintenance. Grâce à des simulations immersives, les opérateurs peuvent étudier des scénarios de pannes et évaluer les meilleures stratégies d'intervention après coup.

Ainsi, JUPITER agit comme un outil de diagnostic et d'apprentissage plutôt que comme un assistant d'auto-maintenance en temps réel. Son rôle est d'aider les opérateurs à comprendre les pannes et à améliorer leurs pratiques de maintenance, renforçant progressivement leurs compétences et leur autonomie dans la gestion des anomalies.

3.2 Processus d'apprentissage et renforcement des compétences

L'approche mise en œuvre avec JUPITER ne se contente pas de signaler les anomalies : elle transforme chaque incident en opportunité d'apprentissage pour les opérateurs. En recréant les conditions de la panne dans un environnement immersif, les opérateurs peuvent :

1. Rejouer l'incident : en analyser les paramètres qui ont conduit à l'anomalie, identifier les erreurs potentielles ou les failles dans les procédures actuelles.
2. Tester des interventions alternatives : en explorant plusieurs scénarios de résolution en toute sécurité, sans impacter la production réelle.
3. Capitaliser les enseignements : consolider les bonnes pratiques, affiner les protocoles de maintenance et partager les retours d'expérience avec l'ensemble de l'équipe.

Cette approche pédagogique, basée sur l'apprentissage par l'erreur, permet non seulement d'améliorer la réactivité opérationnelle mais aussi d'augmenter la confiance et l'autonomie des opérateurs. À terme, cet apprentissage collectif contribue à une culture de maintenance plus proactive et agile.

3.3 Enjeux pour l'évolution future de l'auto-maintenance

Avec le développement de nouvelles technologies immersives et d'intelligence artificielle, les perspectives pour l'auto-maintenance sont prometteuses :

- Intégration de l'IA pour un auto-diagnostique assisté : en exploitant notamment les données historiques des pannes, JUPITER pourrait suggérer automatiquement les meilleures actions correctives en fonction des dysfonctionnement détectés.
- Enrichissement des scénarios immersifs pour des pannes plus complexes, les opérateurs pourraient se préparer à une gamme plus large de situations.
- Réalité augmentée pour une intervention guidée en temps réel : sur le long terme, les opérateurs pourraient recevoir des instructions superposées directement aux équipements via des lunettes AR, accélérant encore les interventions tout en assurant leur sécurité.

La suite du projet JUPITER réside dans sa capacité à évoluer vers un jumeau numérique cognitif, capable de soutenir les opérateurs non seulement dans l'analyse des pannes, mais aussi dans leur résolution proactive. Cette vision s'inscrit dans les objectifs de l'Industrie 4.0, qui permet une production plus flexible et résiliente.

Cependant, si l'auto-maintenance permet aux opérateurs de gérer certaines interventions, les pannes plus complexes nécessitent un accompagnement supplémentaire. Dans ces cas, le jumeau numérique doit aller au-delà du signalement et de l'analyse post-intervention pour devenir un véritable assistant

au diagnostic, capable d'identifier les causes des anomalies et de guider les opérations vers des solutions adaptées.

C'est dans cette perspective que s'inscrit la prochaine évolution du projet JUPITER : le développement d'un jumeau numérique cognitif et collaboratif, intégrant des outils avancés d'assistance au diagnostic pour optimiser la prise de décision et améliorer la réactivité face aux pannes critiques.

4 AIDE AU DIAGNOSTIC : VERS UN JUMEAU NUMÉRIQUE COGNITIF ET COLLABORATIF

4.1 Définition et enjeux de l'aide au diagnostic

Lorsque les opérateurs ne peuvent pas résoudre une panne par eux-mêmes en raison de sa complexité, l'aide au diagnostic devient essentielle. Ce niveau de maintenance vise à fournir un support intelligent aux techniciens en exploitant le jumeau numérique et des technologies immersives pour faciliter l'identification et la résolution des pannes.

Contrairement à l'auto-maintenance (niveau 2), qui repose principalement sur des formations immersives en VR, le niveau 3 s'appuie sur le jumeau numérique collaboratif pour analyser les anomalies et guider les techniciens vers des solutions optimisées. À terme, cette assistance pourrait être renforcée par l'intégration de la réalité augmentée (AR), permettant d'afficher des informations en temps réel directement sur les équipements physiques et permettant la télémaintenance.

Selon Julien et Martin (2021), l'assistance au diagnostic réponse sur plusieurs principes clés :

- Identification des causes probables de la panne en s'appuyant sur l'historique des événements et des données collectées en temps réel.
- Comparaison avec un modèle numérique de référence pour analyser les écarts de fonctionnement.
- Assistance dynamique des techniciens ou opérateurs en fournissant des procédures d'intervention détaillées adaptées à la situation.

L'intégration de la réalité augmentée est en cours de développement dans le projet JUPITER.

4.2 Fonctionnement actuel du jumeau numérique pour l'aide au diagnostic

Actuellement, JUPITER fonctionne comme un outil d'assistance, permettant aux opérateurs de réaliser des diagnostics à partir de scénarios connus. Les principales fonctionnalités mises en place incluent :

1. Un diagnostic basé sur l'adaptation aux situations réelles

    - Lorsque la panne ne correspond pas aux scénarii préétablis du niveau 2, l'opérateur peut observer les solutions alternatives pour résoudre une panne
    - Le jumeau numérique propose une analyse contextuelle, en se basant sur les éléments posant problème. À ce moment-là, l'interface affiche les graphiques nous permettant d'observer l'élément qui dysfonctionne.

2. Intégration de la réalité augmentée pour l'aide au diagnostic

Dans le modèle de Julien et Martin, le niveau 3 repose sur un jumeau numérique capable de s'adapter aux interactions des utilisateurs. Actuellement, il y a quelques évolutions concernant le projet JUPITER :

- Des annotations interactives peuvent être superposées sur les équipements pour guider l'opérateur, avec le développement de la réalité augmentée.
- La structuration des échanges entre opérateurs permettra de centraliser les retours d'expériences et améliorer le partage d'informations.

Par exemple, on peut identifier les cas d'usages suivants :
-Un opérateur qui a déjà résolu une panne similaire pourra ajouter des notes dans JUPITER, permettant aux futurs utilisateurs de bénéficier de recommandations basées sur des expériences réelles.
-Un opérateur confronté à une anomalie pourra utiliser une interface AR sur tablette pour voir les éléments à vérifier directement superposés sur la ligne.
-Il pourra également interagir avec le jumeau numérique en temps réel, en comparant l'état actuel du système avec son comportement attendu.

4.3 Perspectives d'évolution vers un jumeau collaboratif

Selon Julien et Martin (2021), le niveau 3 est le plus complexe à mettre en place, car il intègre plusieurs types d'usages et d'utilisateurs. Pour aller plus loin, le jumeau numérique JUPITER devra progressivement :

- S'adapter aux interactions des utilisateurs en proposant des recommandations personnalisées en fonction du niveau de compétence de l'opérateur (débutant, expert, …)
- Intégrer des algorithmes d'aide à la décision pour exploiter des modèles de machine learning afin d'affiner les suggestions de diagnostic en fonction des historiques de pannes
- Développer des fonctionnalités collaboratives pour permettre aux opérateurs de partager leurs observations en temps réel et demander une assistance technique si nécessaire, en bénéficiant des feedbacks des dysfonctionnement précédents.

Ce qui nous permet d'avoir des objectifs futurs pour la plateforme SCAP et le projet JUPITER comme :

-le développement d'un système d'apprentissage adaptatif, qui ajuste les recommandations en fonction des interventions passées
-la mise en place d'un module de communication expert-opérateur, ce qui permettra un diagnostic à distance plus efficace

-l'amélioration de la gestion des informations techniques, en proposant une documentation interactive plus accessible.

4.4 Transition vers la maintenance prédictive

L'assistance au diagnostic repose sur une évolution du jumeau numérique vers un outil plus intelligent et plus interactif, capable de s'adapter aux pannes complexes et de faciliter la collaboration entre techniciens et experts. Bien que JUPITER ne dispose pas encore de toutes ces fonctionnalités, son développement s'oriente vers une intégration plus poussée des capacités d'analyse et d'interaction collaborative.

Cependant, ce niveau de maintenance reste réactif, car il s'appuie sur la détection de pannes existantes. Pour aller plus loin, il devient nécessaire de prédire les pannes avant qu'elles ne surviennent, en utilisant des modèles d'analyse avancés et de l'intelligence artificielle.

C'est précisément l'objectif du niveau 4 de maintenance, consacré à la maintenance prédictive, qui vise à exploiter les données historiques et les tendances pour anticiper les défaillances et éviter les arrêts de production.

5 MAINTENANCE PRÉDICTIVE : VERS UNE GESTION AUTOMATISÉE DES ANOMALIES

5.1 Définition et enjeux de la maintenance prédictive

La maintenance prédictive représente le niveau le plus avancé de la classification proposée par Julien et Martin (2021), en intégrant l'analyse des données en temps réel et des modèles d'anticipation pour éviter les pannes avant qu'elles ne surviennent.

Dans ce niveau, le jumeau numérique joue un rôle central en surveillant en continu l'évolution des équipements et en détectant des tendances anormales pouvant indiquer une future défaillance.
Les caractéristiques principales de la maintenance prédictive sont :

- L'analyse continue des données des capteurs et la détection des variations inhabituelles dans le système
- La prévision des pannes avant qu'elles ne se produisent avec les exploitations des tendances historiques pour anticiper les anomalies
- L'automatisations des ajustements car le système ne se contente pas d'alerter, il agit pour maintenir la production sans interruption.

Dans JUPITER, ces principes sont déjà en place grâce à :

- l'analyse en temps réel des données capteurs et des vitesses des convoyeurs
- l'identification des tendances anormales dans les graphiques d'évolution des paramètres critiques

- la reconfiguration automatique de la ligne de production pour éviter les arrêts de production.

5.2 Fonctionnement du jumeau numérique JUPITER pour la maintenance prédictive

Pour assurer une maintenance prédictive efficace, JUPITER s'appuie sur un ensemble de processus intégrés, allant de la collecte des données capteurs à la reconfiguration dynamique des flux de production. Cette section explore en détail ces différentes étapes, depuis la surveillance des équipements jusqu'à l'ajustement automatisé des paramètres de production.

5.2.1 : Surveillance des données des capteurs

Le jumeau numérique de la ligne SCAP va analyser les signaux des équipements, notamment sur l'évolution des vitesses des convoyeurs et d'autres paramètres critiques.

Lorsqu'un écart anormal est détecté, JUPITER compare les valeurs actuelles avec les modèles de référence pour évaluer le dysfonctionnement

Comme ci-dessous sur la Figure 4, nous avons l'interface du jumeau numérique avec le message d'erreur et l'évolution des paramètres critiques :

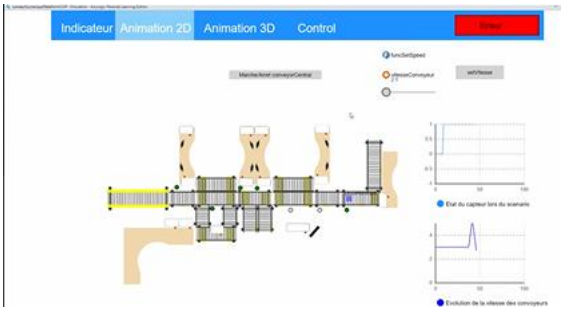


Figure 4 : Alerte de dysfonctionnement de la ligne SCAP

5.2.2 Détection automatique des anomalies et anticipation des pannes

Lorsqu'un capteur enregistre une déviation inhabituelle, le jumeau numérique identifie une tendance de détérioration et prédit une défaillance potentielle.

En effet, grâce à l'historique des données, le jumeau numérique détermine quelle action mettre en place afin d'éviter l'arrêt de la production. Par exemple, si la vitesse d'un convoyeur diminue progressivement, il pourrait s'arrêter et donc provoquer des potentiels problèmes sur la production en cours.

5.2.3 Reconfiguration automatique du système pour éviter l'arrêt de la production

Dans le projet JUPITER, plutôt que d'attendre qu'une panne survienne, il y aura une reconfiguration immédiate pour redistribuer les flux de production. Cette capacité de réajustement dynamique permet de minimiser les interruptions et d'optimiser la gestion des ressources.

Par exemple, si un convoyeur critique commence à ralentir, JUPITER ajuste les itinéraires des produits, en redirigeant les

flux vers d'autres convoyeurs fonctionnels avant que la situation ne devienne critique.

5.2.4 Visualisation et suivi des tendances grâce aux graphiques d'évolution

L'interface de JUPITER affiche des courbes de suivi des paramètres critiques, permettant aux opérateurs d'observer l'évolution des équipements en temps réel.
Ces graphiques permettent aussi d'identifier des tendances récurrentes, et d'améliorer les modèles prédictifs au fil du temps (Figure 3).

5.3 Perspectives d'évolution vers une maintenance autonome

Bien que JUPITER dispose déjà de capacités de maintenance prédictive, certaines améliorations sont envisagées pour aller encore plus loin :

- affiner les modèles prédictifs avec du machine learning : en améliorant la précision des prédictions en exploitant les historiques de pannes et en intégrant des algorithmes d'apprentissage automatique.
- développement d'une version AR afin de faciliter les tâches de maintenance
- intégration d'une interface interactive améliorée : en permettant à un système de visualisation plus détaillé, permettant aux opérateurs de comprendre rapidement l'évolution des équipements et de valider les actions correctives proposées par JUPITER.

5.4 Conclusion et perspectives pour l'optimisation continue de la maintenance

La maintenance prédictive dans JUPITER permet déjà d'anticiper les pannes et d'adapter le système en temps réel, ce qui représente un gain majeur en termes de continuité opérationnelle et d'optimisation des flux.

Cependant, cette approche peut encore être améliorée en intégrant des modèles de prévision encore plus précis et en rendant le jumeau numérique plus autonome dans ses décisions

En combinant maintenance prédictive et d'autres technologies, JUPITER pourrait optimiser la gestion des flux industriels en s'appuyant sur une automatisation avancée, tout en intégrant l'expertise humaine pour superviser et intervenir stratégiquement lorsque nécessaire.
Cette évolution représenterait un changement majeur dans la gestion des systèmes industriels et pourrait constituer un des axes de développement futurs pour SCAP et JUPITER.

6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les jumeaux numériques jouent un rôle clé dans l'évolution des systèmes industriels, en permettant d'optimiser la gestion des flux et la maintenance des équipements. Dans ce travail, nous avons analysé l'évolution du projet JUPITER sur la plateforme SCAP, en explorant comment il progresse d'un simple modèle de simulation vers un outil intelligent et prédictif.

Nos résultats montrent que JUPITER a permis de réduire les arrêts de production grâce à une maintenance prédictive basée sur l'analyse des données en quasi temps réel. Cette capacité d'anticipation et d'adaptation dynamique confirme l'intérêt des jumeaux numériques pour une gestion industrielle plus résiliente.
Cependant, l'évolution du jumeau numérique ne s'arrête pas à la maintenance prédictive : il doit progressivement intégrer des capacités d'auto-apprentissage, de collaboration et d'autonomie, comme illustré dans la Figure 5 :

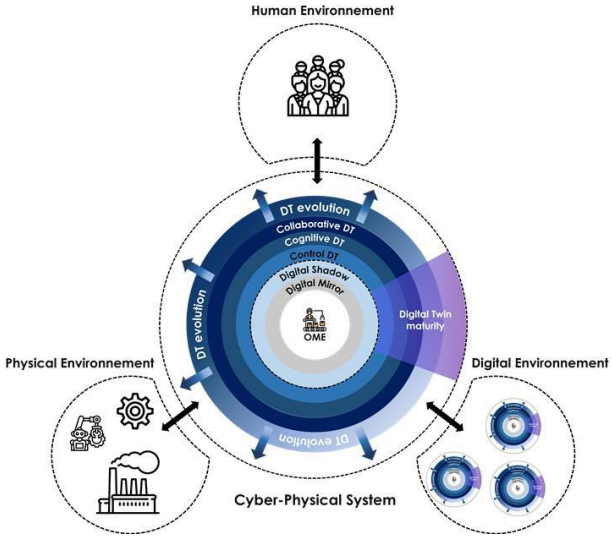


Figure 5 : Maturité du jumeau numérique

L'illustration ci-dessus met en évidence l'évolution progressive des jumeaux numériques selon trois axes principaux, présentée dans (Hamzaoui and Julien, 2022) :

1. L'interaction avec l'environnement physique (Physical Environment) : le jumeau numérique capte et analyse des données issues du système cyber-physique (ex. capteurs, équipements industriels).
2. L'intégration au sein d'un environnement numérique (Digital Environment) : à mesure que le jumeau numérique évolue, il s'enrichit de modèles plus sophistiqués et de capacités d'analyse avancées et il s'interface avec d'autres jumeaux numériques.
3. Son interaction avec l'humain (Human Environment) : le jumeau numérique doit devenir un outil collaboratif, facilitant les interactions entre opérateurs, techniciens et experts distants.

Ce schéma met en évidence les différentes étapes de maturité d'un jumeau numérique, allant du simple miroir numérique (Digital Mirror) à un jumeau numérique cognitif et collaboratif :

- Digital Mirror & Digital Shadow : le jumeau numérique commence par être une réplique fidèle du système physique, capable de suivre son état en temps réel.
- Control Digital Twin (DT) : il intègre des mécanismes de contrôle, influençant le comportement du système physique en ajustant certains paramètres.
- Cognitive Digital Twin : il devient capable d'analyser et d'interpréter les données de manière autonome, grâce à des modèles prédictifs avancés et à l'IA.

- Collaborative Digital Twin : le jumeau numérique interagit en temps réel avec les opérateurs favorisant une prise de décision collective et adaptative.

Dans le cas du projet JUPITER, nous nous situons actuellement entre le Control DT et le Cognitive DT, avec des avancées significatives en matière de maintenance prédictive. Toutefois, l'objectif à long terme est d'atteindre un modèle de jumeau numérique plus collaboratif et intelligent, intégrant davantage de capacités d'apprentissage et d'interaction homme-machine.

Les résultats obtenus montrent que JUPITER optimise la gestion des pannes et réduit les interruptions en anticipant les défaillances. Cependant, plusieurs défis restent à relever :

- Fiabilité des modèles prédictifs : l'efficacité de la maintenance repose sur la précision des prédictions. L'ajout de modèles de machine learning permettrait d'affiner encore davantage ces prévisions.
- Interaction humain-système : si JUPITER est déjà capable de recommander des actions correctives, l'objectif est d'évoluer vers des niveaux de collaboration plus avancés pour améliorer l'assistance aux opérateurs.
- Intégration de nouvelles technologies : l'ajout de capteurs supplémentaires et de la réalité augmentée (AR) pourrait améliorer la compréhension des anomalies et la réactivité du système.

Ainsi, l'évolution des jumeaux numériques représente une transition vers une industrie où la frontière entre assistance humaine et automatisation devient de plus en plus fine.

7 REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont à M. Iehann EVENO, ingénieur d'études à SCAP Industrie du Futur et enseignant en Génie Industriel 4.0 à l'ENSIBS, ainsi qu'à M. Clément MICHEL, ingénieur d'étude, pour leurs précieuses contributions.

8 RÉFÉRENCES

Julien, N., & Martin, E. (2021). How to characterize a Digital Twin: A Usage-Driven Classification. *IFAC PapersOnLine*, *54*(1), 894–899. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.106

Khan, S., Farnsworth, M., McWilliam, R., & Erkoyuncu, J. (2020). On the requirements of digital twin-driven autonomous maintenance. *Annual Reviews in Control*, *50*, 13–28. https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2020.08.003

Julien, N., & Martin, E. (2021). A usage-driven approach to characterize and implement industrial digital twins. Proceedings of the 31st European Safety and Reliability Conference. Research Publishing, Singapore. https://doi.org/10.3850/978-981-18-2016-8_373-cd

Ke, S., Xiang, F., Zhang, Z., & Zuo, Y. (2019). An enhanced interaction framework based on VR, AR and MR in digital twin. *Procedia CIRP*, *83*, 753–758. https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.103

Hamzaoui, M.A., Julien, N., 2022. Social Cyber-Physical Systems and Digital Twins Networks: A perspective about the future digital twin ecosystems. Presented at the 6th IFAC Symposium on Telematics Applications, TA'2022, Nancy, France, p. 6. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.08.006

Ulansky, V., & Raza, A. (2024). A historical survey of corrective and preventive maintenance models with imperfect inspections: Cases of constant and non-constant probabilities of decision making. Aerospace, 11(1), 92. https://doi.org/10.3390/aerospace11010092

Viaron, K., Julien, N., & Hamzaoui, M. (2024). *Digital Twin For Maintenance: Overview And Trends*. Collection ESREL 2024. Retrieved from HAL Archive.

Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. Procedia Manufacturing, 11, 939-948. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Un modèle innovant de supply chain alliant Blockchain et théorie des jeux

MUSTAPHA HROUGA[1], DHAOU SAID[2]

[1] Rabat Business School, International University of Rabat
RABAT SALÉ, MAROC
mustapha.hrouga@uir.ac.ma

[2] School of Electrical Engineering and Computer Science, University of Ottawa, Canada
dhaou.Said@usherbrooke.ca

***Résumé* – Cet article propose de combiner la Blockchain (BT) et la Théorie des jeux (GT) afin d'augmenter l'efficacité et de réduire les coûts de la supply chain (SC). Cette combinaison nous conduit vers une SC efficace, flexible, résiliente, durable et optimisée. Pour atteindre ces objectifs, nous proposons un nouveau modèle de planification de la distribution avec des demandes stochastiques et des ventes perdues. Dans ce modèle, nous considérons plusieurs participants tels que les fournisseurs, les transporteurs, les grossistes, les détaillants et les clients finaux et chaque participant recherche une meilleure offre en termes de coût du produit, de délai de livraison et de qualité du produit. Nous sommes les premiers à proposer une solution de contrat intelligent basée sur le modèle GT entre les acteurs de la SC. Une étude de performance est menée pour prouver l'efficacité de notre modèle combiné BT et GT proposé.**

***Abstract* – This paper proposes to combine Blockchain and Game theoretical in order to increase efficiency and reduce SC costs. This combination leads us towards for an efficient, flexible, resilient, sustainable, and optimized SC. To achieve these goals, we propose a new distribution planning model with stochastic demands and lost sales. In this model we consider several participants such as suppliers, carriers, wholesalers, retailers, and end customers and each participant seek a better offer in terms of product cost, delivery lead time, and product quality. We are the first to propose a smart contract solution based on GT model between SC actors. A performance study is conducted to prove the efficient of our proposed combined BT and GT model.**

***Mots clés* - Décentralisation, planification, technologie blockchain, théorie des jeux, industrie 4.0, chaîne d'approvisionnement, logistique 4.0.**
***Keywords* – Decentralized, Planning, Blockchain Technology, Game Theoretic, Industry 4.0, Supply Chain, Logistics 4.0.**

1 INTRODUCTION

La chaîne d'approvisionnement actuelle est très compliquée, elle n'est pas très efficace et elle ne peut pas répondre aux demandes des clients qui deviennent de plus en plus difficiles en termes de délai de livraison, de disponibilité des produits, de baisse des coûts de livraison et d'incertitude Abdel-Basset et al. (2018) et Xie et al. (2020). Dans cette chaîne d'approvisionnement, une architecture centralisée est souvent utilisée pour stocker les informations en appliquant les technologies de l'Internet des objets (IoT) pour gérer les données Wang et al. (2020). En outre, cette chaîne d'approvisionnement traditionnelle est confrontée à de nombreux défis en raison de la complexité des réseaux. Tout d'abord, le portefeuille de produits, comme le nombre de références à gérer, complique les choses, en particulier pour les composants des produits Inman et Blumenfeld (2014). Deuxièmement, pour les processus de fabrication, la complexité réside dans la méthode de fabrication, en particulier le nombre d'étapes et d'activités qui sont mobilisées et dans la capacité d'information à gérer afin de réaliser les produits finis. Troisièmement, du point de vue du réseau, le nombre d'acteurs et d'entités internes impliqués dans la chaîne d'approvisionnement génère une complexité des systèmes d'information et des systèmes d'interface Battini et al. (2007) et Cheng et al. (2014). Par conséquent, cette complexité entraîne des coûts élevés dans les différents réseaux de la chaîne d'approvisionnement, ce qui a un impact direct sur le niveau de satisfaction des clients. Par exemple, au stade de la prévision des ventes, la demande est anticipée de manière moins fiable lorsqu'elle porte sur un large éventail de références. Du point de vue de la logistique, il est plus coûteux de gérer un grand nombre de références et, par conséquent, de petits lots. En outre, les stocks de sécurité sont plus importants en raison de la moindre fiabilité des prévisions. Au stade de la fabrication, l'outil de production doit pouvoir s'adapter à différents produits, et la courbe d'apprentissage est moins favorable que pour un processus standard. Ou encore au stade de l'approvisionnement, l'entreprise ne peut plus jouer sur son pouvoir d'achat lorsque les quantités de nombreuses références sont limitées.

Pour faire face à la complexité de la chaîne d'approvisionnement mentionnée précédemment, la technologie Blockchain (BT) semble être une solution

efficace. En effet, la BT a gagné beaucoup d'attention dans plusieurs secteurs de la recherche et de l'industrie, et plus particulièrement dans le domaine de la chaîne d'approvisionnement et de la logistique Korpela et al. (2017), Karamchandani et al. (2019), et Subramanian et al. (2020). Grâce à sa nature simplifiée puisqu'il permet de garder la confidentialité intacte et efficace par rapport à un système centralisé classique. De plus, pour améliorer l'efficacité, la traçabilité et la transparence des chaînes d'approvisionnement et de la logistique, le BT semble être une solution très efficace. En effet, elle offre une meilleure visibilité et une plus grande transparence en supprimant la troisième partie de la confiance dans la chaîne d'approvisionnement. La blockchain peut servir de source d'information unique et renforcer l'intégration de toutes les fonctions de la chaîne d'approvisionnement Korpela, Hallikas et al. (2017). Elle contribue à améliorer l'efficacité, à gérer les ressources et à réduire les coûts de détention des stocks grâce à sa capacité à créer des enregistrements d'activité. Cela permet aux chaînes d'approvisionnement d'atténuer les risques à moindre coût par rapport aux chaînes d'approvisionnement traditionnelles où les stocks sont très élevés Ivanov et al. (2018) et Ivanov et Dolgui (2021). En outre, Gromovs et Lammi (2017) ont fourni une étude conceptuelle pour montrer les impacts des technologies telles que la BT, l'Internet des objets (IoT) et l'impression 3D sur la performance logistique, ils soulignent qu'il est nécessaire d'adopter ces nouvelles technologies pour améliorer la chaîne logistique. En outre, le BT est devenu une technologie basée sur l'échange d'informations, c'est une nouvelle méthode qui peut être utilisée dans le domaine de la chaîne d'approvisionnement pour améliorer la visibilité, la traçabilité et la transparence des flux d'informations, de produits et de services Azzi et al. (2019). Associé aux smart contracts, le BT augmente l'efficacité et la transparence des documents et des transactions pour des chaînes d'approvisionnement innovantes et agiles. En effet, les contrats intelligents sont générés sous la forme d'un code informatique qui est ensuite hébergé sur une blockchain qui définit et exécute les termes d'un accord entre tous les acteurs impliqués dans la chaîne d'approvisionnement.

Nos contributions sont mises en évidence comme suit :

- Nous développons un nouveau modèle de planification avancé pour une SC 4.0,

- Nous proposons une combinaison de BT avec le modèle GT pour améliorer l'efficacité du SC,

- Nous proposons une solution de contrat intelligent basée sur le modèle GT entre les acteurs du SC,

- Nous mettons en œuvre une nouvelle solution en utilisant plusieurs outils logiciels pour mettre en évidence ses performances,

- Nous prouvons un niveau de maximisation de la satisfaction pour tous les acteurs du SC impliqués.

Le reste du document est organisé comme suit. La section 2 présente revue de la littérature. La section 3 présente le modèle de planification stochastique considéré dans ce travail. La section 5 présente la mesure de performance du modèle. Les résultats et les évaluations de performance sont discutés dans la section 5. Enfin, des conclusions et des perspectives sont tirées dans la section 6.

2 REVUE DE LA LITTERATURE

2.1 Les avantages de BT dans la planification logistique et SC

Plusieurs auteurs ont confirmé que la BT peut offrir de nombreux avantages pour résoudre le problème de traçabilité, de transparence, de sécurité et de fiabilité dans les SC. Cependant, aucune analyse n'est présentée par les auteurs afin de mieux comprendre les avantages tels que la transparence et la traçabilité que la blockchain peut offrir dans la logistique. Contrairement à notre étude, tous les acteurs deviennent des participants tels que les vendeurs ou les acheteurs tout en maximisant le niveau de satisfaction de chaque acteur. Liu et Li (2020) ont confirmé les avantages de la BT identifiés par Liao et Wang (2018). En effet, avec sa fonctionnalité décentralisée, la BT offre des transactions beaucoup plus transparentes et fiables par rapport à celles générées par les systèmes centralisés. Le modèle conçu par les auteurs ne peut pas être mis en œuvre dans la vie réelle car il ne prend pas en compte la collaboration à tous les niveaux de la SC. Cependant, dans notre étude, nous intégrons tous les acteurs de la chaîne depuis l'approvisionnement jusqu'au client final. Pournader et al. (2020) ont également identifié des critères de confiance et de traçabilité/transparence du BT appliqués dans le commerce. De plus, Liu et Li (2020) ont développé un ensemble de techniques et méthodes pour obtenir des produits avec des transactions traçables dans la gestion SC sur le contexte du commerce électronique transfrontalier. Cependant, les auteurs ne montrent pas quels sont les objectifs à atteindre par la blockchain dans la logistique comme la minimisation des coûts, la sécurisation de la transaction, l'augmentation de la confiance ou encore la mise en place de contrats intelligents. Une autre étude sur la faisabilité de la blockchain dans la logistique est proposée par Ar et al. (2020). Les auteurs ont proposé une approche quantitative basée sur un outil d'aide à la décision qui intègre l'approche Analytical Hierarchy Process (AHP) dans VIKOR dans le contexte du BT. Ensuite, huit critères ont été considérés dans cette étude tels que l'évolutivité, la confidentialité, l'interopérabilité, l'audit, la latence, la visibilité, la confiance et la sécurité. Les résultats de l'étude ont montré que la mise en œuvre d'une BT sera basée sur les critères les plus importants. Par exemple, si la sécurité, la visibilité et l'audit sont les critères les plus importants, alors les opérations logistiques à prendre en compte dans la BT seront le transport, l'entreposage, la manutention et le traitement des commandes. Dans leur étude, les auteurs n'ont pas précisé les échelons de la SC afin d'étudier la faisabilité de la blockchain. Contrairement à notre étude, nous considérons la SC multi-échelons du fournisseur au client final. De plus, Wang et al. (2019) suggèrent trois avantages de la BT, i) améliore la transparence de la SC, ii) assure un partage sécurisé des informations et renforce la confiance, et iii) permet des améliorations opérationnelles. Malgré les efforts des chercheurs pour identifier les avantages de la BT, les données théoriques et empiriques manquent toujours. De plus, les auteurs ne montrent pas quels acteurs sont impliqués et comment ils sont interconnectés dans une SC.

2.2 Les avantages du GT dans la planification logistique et SC

Une stratégie collaborative SC efficace en termes de partage d'informations peut améliorer l'efficacité de l'entreprise, en particulier lors de l'intégration d'un nouveau partenaire dans le

SC Zhiwen et al. (2020). Balza-Franco et al. (2017) ont simulé un réseau logistique pour évaluer l'importance de la coopération sur les différents concurrents. Le modèle de simulation proposé vise à minimiser le coût d'approvisionnement des articles pour le réseau logistique et permet aux fournisseurs d'évaluer les avantages de la coopération. Mais il est clair que la collaboration doit être encore améliorée afin de motiver les entreprises à adopter une approche collaborative et ainsi réaliser les avantages du SC. Zhiwen et al. (2020) ont construit un modèle de jeu de collaboration d'informations logistiques SC évolutif à deux échelons en intégrant les fournisseurs et les fabricants. L'objectif était de maximiser les avantages sur la base de deux stratégies, la première traite les fournisseurs et les fabricants séparément, et la seconde les combine ensemble. Ainsi, les auteurs ont analysé certaines stratégies des acteurs impliqués tels que les fournisseurs et les fabricants afin de maximiser certains avantages. Les auteurs n'ont pas déterminé quels avantages devaient être maximisés. Contrairement à notre étude, nous proposons de maximiser le niveau de satisfaction client à savoir : la demande, le coût, le délai de livraison et les dommages des produits lors des opérations de transport. De plus, Zhao et al. (2010) ont proposé une approche de jeu coopératif pour évaluer le problème de coordination dans une SC à deux échelons qui intègre fabricant-détaillant en utilisant des contrats d'option. L'étude a montré que les contrats peuvent coordonner la SC et améliorer le service client en minimisant le prix de vente. Dans leur étude, les auteurs proposent un contrat d'option afin de minimiser le coût, alors que dans notre étude nous améliorons considérablement la satisfaction de tous les participants y compris le client. De plus, Lozano et al. (2013) ont proposé un modèle linéaire pour étudier les économies de coûts que les entreprises peuvent réaliser en mutualisant le transport. Cependant, le modèle proposé ne prenait pas en compte les risques associés à la mutualisation. De plus, les auteurs n'ont pas identifié les avantages de la collaboration sur d'autres activités logistiques, en particulier le partage d'informations en temps réel et la traçabilité.

3 MODELE DE PLANIFICATION STOCHASTIQUE

La complexité des modèles de planification des chaînes d'approvisionnement met en évidence la nécessité d'apporter un soutien aux décideurs depuis le fournisseur jusqu'au client final. Ainsi, les entreprises sont considérées comme disposant d'un ensemble de ressources qu'elles possèdent ou louent (entrepôts, transporteurs, etc.) afin de réaliser leur processus de planification. Dans ce système, de nombreuses choses peuvent être contrôlées, mais beaucoup d'autres ne sont pas prévisibles. Par exemple, des contrats peuvent être négociés avec des transporteurs pour assurer un certain niveau de service comme la capacité de production, de transport et de stockage sur une période donnée, sans tenir compte de la capacité nécessaire.
Dans ce travail, nous considérons un modèle de planification de chaîne d'approvisionnement à deux échelons où les grossistes et les détaillants s'approvisionnent auprès des fabricants afin de satisfaire leurs clients comme présenté dans la figure 1. Ces chaînes d'approvisionnement sont de plus en plus difficiles à gérer. Certaines entreprises proposent de plus en plus de produits aux consommateurs, ce qui rend les achats et la gestion des entrepôts beaucoup plus complexes. Les fournisseurs sont également considérés comme plus éloignés, ce qui entraîne encore plus d'incertitudes sur les délais de transport.

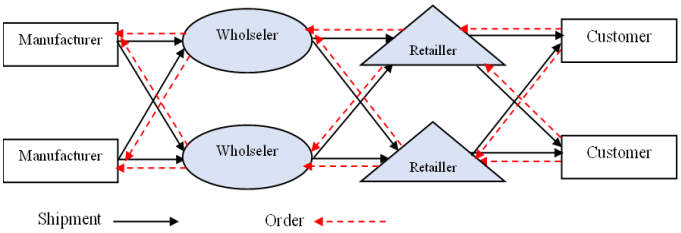


Figure 1. Modèle de chaîne d'approvisionnement à plusieurs échelons

En ce qui concerne les grossistes, nous considérons que chacun d'entre eux, noté *w*, prévoit les demandes à l'aide d'une probabilité de distribution. Nous utilisons les politiques de gestion des stocks et de prévision de la demande pour montrer le type d'informations qui seront partagées entre les détaillants et les grossistes Longo et Mirabelli (2008). Nous développons un modèle de contrôle des stocks et de prévision de la demande basé sur une politique de contrôle des stocks de type (r, R) où les grossistes et les magasins peuvent déterminer la quantité de marchandises à échanger (Make in order). En outre, nous considérons une quantité $Q_{it,n}$ d'un article i qui sera commandée au cours d'une période t qui dépend du niveau de stock cible (TSL) $\beta_{it,n}$. Le TSL représente la quantité de produit que nous voulons avoir sous la main à un moment donné. La position de l'inventaire $I_{it,n}$ est utilisée pour déterminer le TSL à l'aide d'une probabilité de distribution. Ainsi, la quantité $Q_{it,n}$ peut être calculée à l'aide des équations de conservation des stocks (1) et (2) où $L_{it,n}$ est la quantité de ventes perdues d'un article i à la période t au nœud de réseau n . Ici, la vente perdue représente la quantité à perdre si la demande n'est pas entièrement satisfaite. Notre modèle de combination est présenté dans la figure 2.

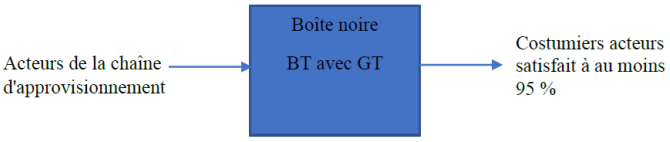


Figure 2. Combinaison de BT et GT

$\beta_{it,n}$: niveau de stock cible (TSL) de l'article au cours de la période au niveau du nœud du réseau
$I_{i,t-1,n}$: stock initial ou (stock disponible) de l'article i à la période t au nœud de réseau n
$I_{it,n}$: position d'inventaire de l'article i à la période t au réseau n
$L_{it,n}$: ventes perdues de article i à la période t du réseau n
$Q_{it,n}$: quantité d'article commandée i à la période t du réseau n.

$$Q_{it,n} = \beta_{it,n} - I_{it,n} + L_{it,n} \text{ pour } i = 1, \dots, K;\ t = 1, \dots, T \text{ et } n = 1, \dots, N$$

$$I_{it,n} = I_{i,t-1,n} + Q_{it,n} - d_{it,n} + L_{it,n} \text{ pour } i = 1, \dots, K;\ t = 1, \dots, T \text{ et } n = 1, \dots, N$$

En général, les niveaux de stock cibles $\beta_{it,n}$ d'un article i à la période t au nœud de réseau n

$$\beta_{it,n} \leq I_{i,t-1,n} + SS_{it,n} + L_{it,n} \text{ pour } i = 1, \dots, K;\ t = 1, \dots, T \text{ et } n = 1, \dots, N$$

4 MESURES DE PERFORMANCE DE LA CHAINE D'APPROVISIONNEMENT

Afin d'évaluer et de mesurer la performance de la chaîne logistique, il est nécessaire de calculer le taux de satisfaction $SR_{it,n}$ de chaque acteur, y compris le client. Pour ce faire, on détermine le rapport entre le nombre de commandes satisfaites $SO_{it,n}$, et le nombre total de commandes $TO_{it,n}$. En outre, il est également nécessaire d'évaluer et de calculer le coût total des stocks et le coût moyen des stocks par jour, par article, par coût et le bénéfice net.

$$STF = \frac{ON}{OD} * \frac{DLT}{ADL} * \frac{DC}{AC} * \frac{NDP}{TDP}$$

Le stock disponible est vérifié chaque jour avant et après les heures de travail afin de garantir la disponibilité d'un niveau de stock moyen acceptable. Le coût total du stock peut donc être calculé en considérant également le coût d'achat comme suit :

$$TIC_{in} = TCP_{in} + THC_{in} * I_{i,t-1,n} + PuC_{it} * Q_{it,n} \quad \forall\, i,t,n$$

Où PuC_{it} représente le coût d'achat.

5 MODELE COMBINE

Cette partie se concentre sur la résolution du problème présenté dans la section et les sous-sections précédentes. Cette méthode de résolution vise à combiner GT et BT.

Étant donné que les actions de vente/achat d'un participant influencent tous les autres (acheteurs et vendeurs) et que le processus d'enchères dépend de la stratégie de tous les participants au cours du processus d'enchères, nous adoptons une GT pour résoudre le modèle proposé. La solution à ce problème peut être basée sur l'équilibre de Stackelberg Hua et al. (2019). Dans ce qui suit, nous détaillons la conception d'un nouveau modèle de GT basé sur le système de blockchain logistique entre tous les participants (acheteurs et vendeurs) avec la modélisation des données et le contrat intelligent correspondant.

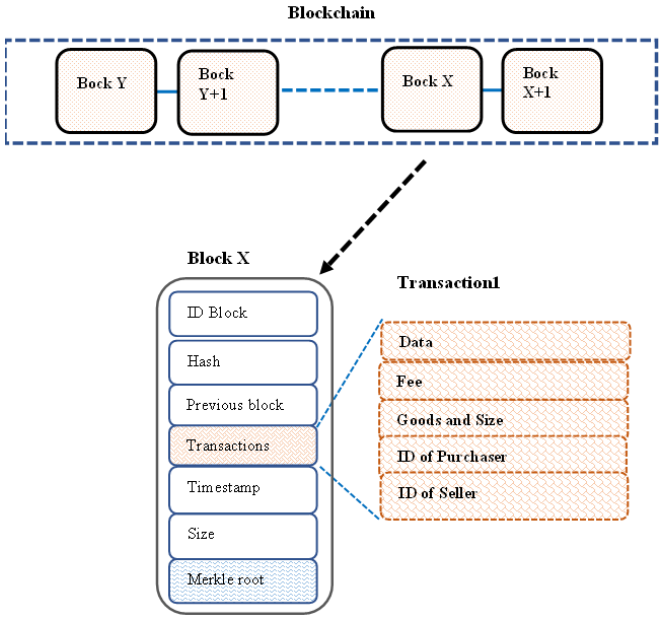


Figure 3. Bloc de données conceptuel dans notre (BT+GT)

La figure 3 présente les blocs de données conceptuels utilisés dans le système proposé. Le numéro de bloc identifie le bloc actuel ; les champs de hachage et de bloc précédent sont les valeurs de hachage décrivant respectivement le contenu du bloc actuel et celui du bloc précédent. Le champ de transaction désigne le processus d'échange entre l'acheteur et le vendeur. La date de création et la taille du bloc actuel sont stockées respectivement dans les champs "timestamp" et "size". Le champ racine merkle est la valeur de hachage de toutes les paires hachées précédentes dans l'arbre.

En ce qui concerne le mécanisme de création de blocs, après la création du bloc de genèse (le premier), un participant (vendeur ou acheteur) intéressé par les marchandises et après s'être assuré de son identité, peut créer un nouveau bloc, le lier à la chaîne et le diffuser sur le réseau. Lorsque les autres participants reçoivent ce bloc, ils procèdent à sa validation en vérifiant la signature, le hachage et la validité de la charge utile. Cette dernière action permet de s'assurer que les données sont protégées contre toute modification non autorisée. Le bloc valide est ajouté à la chaîne et ne peut pas être modifié. Le bloc non valide est éliminé de la chaîne.

Dans le système d'échange que nous proposons, nous supposons qu'un système de réseau de communication efficace doté d'un mécanisme sécurisé de préservation de la vie privée est utilisé pour relier tous les participants au système d'échange. Par conséquent, nous considérons qu'il n'y a pas de problème de confidentialité des participants dans ce travail.

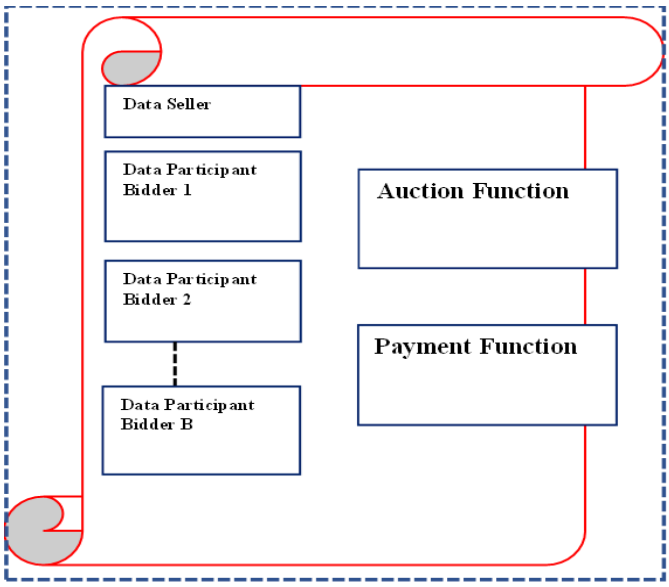


Figure 4. Contrat intelligent du participant

Le contrat intelligent est un protocole numérique qui simplifie le processus d'accord entre les différents participants en imposant des clauses prédéfinies telles que les fonctions d'enchères et de paiement.
Ce contrat doit être accepté par toutes les parties restantes (vendeurs et acheteurs) en signant une acceptation au début de la connexion au serveur de la blockchain. Comme le montre la figure 4, les données de l'enchérisseur sont composées du profil de l'enchérisseur (une clé cryptographique représentant la propriété du participant), de la quantité de biens demandés, du moment de la transaction et du prix. Le vendeur de données est composé du profil du vendeur (une clé cryptographique représente la propriété du participant), de la quantité de biens à vendre et du moment de la transaction. Chaque acheteur

soumet plusieurs offres à la blockchain. L'acheteur a besoin d'au plus un vendeur, et nous supposons qu'il ne peut pas y avoir d'offres en double pour le même vendeur.

Dans ce qui suit, nous simulons notre modèle (BT+GT). Pour prouver la performance de notre schéma (BT+GT) proposé, nous étudions son comportement en termes de maximisation du niveau de satisfaction total STF pour les vendeurs et les acheteurs qui est calculé selon quatre paramètres : i) la satisfaction de la demande qui est décrite par le ratio ON/OD (besoins commandés / commandes livrées), ii) la satisfaction du délai de livraison qui est mesurée par le ratio DLT/ADL (délai de livraison souhaité / délai de livraison réel), iii) le coût d'achat DC/AC (coût souhaité / coût réel), iv) la quantité de produit endommagé NDP/TDP (le nombre de produit endommagé / le nombre total de produit livré). En fait, nous considérons plusieurs vendeurs et acheteurs où le vendeur veut vendre avec un meilleur prix et l'acheteur de son côté recherche la meilleure offre. Cette offre comprend les meilleurs prix d'achat, un délai de livraison court, un produit moins endommagé et des demandes entièrement satisfaites). Nous sommes donc dans un marché concurrentiel et le vendeur qui propose la meilleure offre respectant les quatre ratios sera choisi par l'acheteur.

$$STF = \frac{ON}{OD} * \frac{DLT}{ADL} * \frac{DC}{AC} * \frac{NDP}{TDP}$$

L'objectif est de maximiser le niveau de satisfaction totale en maximisant l'équation précédente. Pour cette question, la figure 5 compare les résultats des simulations avec et sans (BT+GT) (représentés respectivement par les couleurs bleue et rouge). Il est clair que le modèle avec (BT+GT) est plus performant que le scénario sans (BT+GT). Ce résultat prouve l'efficacité de la chaîne que nous proposons en utilisant les modèles BT et GT. Il s'explique par le fait que notre modèle est basé sur le modèle BT et utilise la technique GT pour le processus d'enchères entre les participants afin d'optimiser les prix de vente et d'achat en tenant compte de la situation du marché. Notre système optimise la quantité échangée, le délai de livraison et le prix de vente et d'achat des marchandises entre les vendeurs et les acheteurs en même temps. Il permet une meilleure gestion de la quantité de marchandises vendues par les vendeurs.

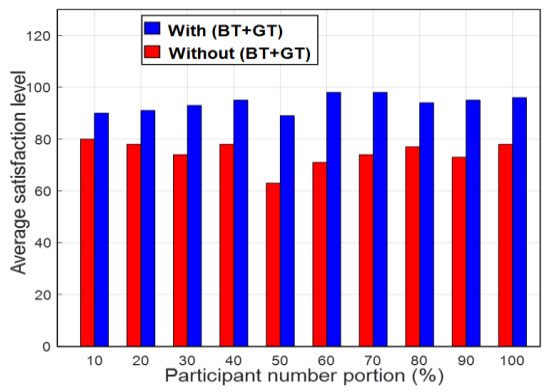


Figure 5. Variation du niveau de satisfaction moyen avec et sans l'utilisation de (BT+GT)

Le tableau 1 présente les résultats d'observation obtenus à partir de la figure 5, qui illustre la performance de notre modèle (BT+GT). Comme le montre le tableau II, il est clair que le système que nous proposons améliore la chaîne logistique entre les vendeurs et les acheteurs avec un taux d'économie supérieur à 18 %. En outre, notre modèle (BT+GT) augmente ses performances (de 18,5 % à 25 %) lorsque le nombre de participants augmente. Cela peut s'expliquer par le fait qu'avec le modèle GT compétitif, lorsque le nombre de participants augmente, il y a plus de chances qu'un acheteur ou un vendeur soit profondément satisfait étant donné la diversité des besoins des participants. En revanche, lorsque le nombre de participants augmente, le nombre de blocs augmente et le nombre de transactions par seconde diminue. Deuxièmement, la résolution du modèle GT prend plus de temps et devient de plus en plus complexe. Par conséquent, nous envisageons un compromis entre le nombre de participants et la complexité du modèle (BT+GT).

Tableau 1. Performances du modèle (BT+GT)

$$\boldsymbol{gap = With\ (BT + GT)\ value - Without\ (BT + GT)/\ With\ (BT + GT)}$$

Participants' number	With (BT +GT)	Without (BT+GT)	Increasingly gap (%)
Under 50%	91.6	74.6	**18.5**
51% to 100%	96.2	72.1	**25.05**

6 CONCLUSION

Dans cet article, nous avons proposé un modèle avancé de planification de la chaîne d'approvisionnement à deux échelons dans lequel les grossistes et les détaillants s'approvisionnent auprès des fabricants afin de satisfaire leurs clients. Nous avons considéré une demande stochastique où les demandes sont variables et où les ventes perdues sont autorisées. La demande perdue sera alors enregistrée pour calculer le taux de remplissage des stocks. L'objectif est de maximiser le niveau de satisfaction totale des vendeurs et des acheteurs qui est calculé en fonction de quatre paramètres tels que la satisfaction de la demande, le délai de livraison, la quantité de produits endommagés et le coût d'achat. Pour résoudre ce problème, nous avons proposé de combiner la technologie blockchain et le modèle de la théorie des jeux. Cette combinaison a permis montrer le rôle de la théorie des jeux pour partager des informations en temps réel, minimiser les coûts de transport, de production et de stockage et améliorer la satisfaction des clients. En outre, la blockchain permet d'améliorer la traçabilité, de sécuriser les transactions et d'assurer la confiance entre tous les acteurs impliqués dans une chaîne d'approvisionnement. Les résultats montrent que malgré les avantages de cette technologie, sa mise en œuvre dans la chaîne d'approvisionnement n'est pas facile pour plusieurs raisons telles que i) le temps de développement et de mise en œuvre est relativement long et présente des incertitudes. De plus, les organisateurs doivent maîtriser l'utilisation de cette technologie dans le domaine de la logistique et des chaînes d'approvisionnement, ii) la forte dépendance, la difficulté du processus d'intégration et les coûts élevés de la mise en œuvre Golosova et Romanovs (2018), et iii) en raison de sa complexité, les transactions blockchain peuvent être lentes par rapport aux systèmes de paiement traditionnels

tels que l'argent liquide ou les cartes de débit.

REFERENCES

Abdel-Basset, M., Manogaran, G., & Mohamed, M. (2018). Internet of Things (IoT) and its impact on supply chain: A framework for building smart, secure and efficient systems. *Future Generation Computer Systems*, *86*, 614-628.

Xie, Y., Yin, Y., Xue, W., Shi, H., & Chong, D. (2020). Intelligent supply chain performance measurement in Industry 4.0. *Systems Research and Behavioral Science*, *37*(4), 711-718.

Wang, Z., Guo, L., Xu, W., & Kang, T. (2020). A Secure and Credible Supply Chain System Based on Blockchain. In *Signal and Information Processing, Networking and Computers* (pp. 88-95). Springer, Singapore.

Inman, R. R., & Blumenfeld, D. E. (2014). Product complexity and supply chain design. *International Journal of Production Research*, *52*(7), 1956-1969.

Battini, D., Persona, A., & Allesina, S. (2007). Towards a use of network analysis: quantifying the complexity of Supply Chain Networks. *International Journal of Electronic Customer Relationship Management*, *1*(1), 75-90.

Cheng, C. Y., Chen, T. L., & Chen, Y. Y. (2014). An analysis of the structural complexity of supply chain networks. *Applied Mathematical Modelling*, *38*(9-10), 2328-2344

Korpela, K., Hallikas, J., & Dahlberg, T. (2017). Digital supply chain transformation toward blockchain integration.

Karamchandani, A., S. K. Srivastava, and R. K. Srivastava. 2019. "Perception-based model for analyzing the impact of enterprise blockchain adoption on SCM in the Indian service industry." *International Journal of Information Management* 52: 10-20.

Subramanian, N., A. Chaudhuri, and Y. Kayıkcı. 2020. "Blockchain Applications and Future Opportunities in Transportation." *In Blockchain and Supply Chain Logistics*: 39-48.

Ivanov, D., Sethi, S., Dolgui, A., & Sokolov, B. (2018). A survey on control theory applications to operational systems, supply chain management, and Industry 4.0. *Annual Reviews in Control*, *46*, 134-147.

Ivanov, D., & Dolgui, A. (2021). A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0. *Production Planning & Control*, *32*(9), 775-788.

Gromovs, G., & Lammi, K. (2017). Blockchain and internet of things require innovative approach to logistics education. *Transport Problems*, *12*, 23-34.

Azzi, R., Chamoun, R. K., & Sokhn, M. (2019). The power of a blockchain-based supply chain. *Computers & industrial engineering*, *135*, 582-592.

Liu, Z., & Li, Z. (2020). A blockchain-based framework of cross-border e-commerce supply chain. *International Journal of Information Management*, *52*, 102059.

Liao, D. Y., & Wang, X. (2018). Applications of Blockchain Technology to Logistics Management in Integrated Casinos and Entertainment. Informatics, 5 (4), 44.

Pournader, M., Shi, Y., Seuring, S., & Koh, S. L. (2020). Blockchain applications in supply chains, transport and logistics: a systematic review of the literature. *International Journal of Production Research*, *58*(7), 2063-2081.

Ar, I. M., Erol, I., Peker, I., Ozdemir, A. I., Medeni, T. D., & Medeni, I. T. (2020). Evaluating the feasibility of blockchain in logistics operations: A decision framework. *Expert Systems with Applications*, *158*, 113543.

Zhiwen, Z., Yujun, X., Junxing, L., Limin, G., & Long, W. (2020). Supply chain logistics information collaboration strategy based on evolutionary game theoretic. *IEEE Access*, *8*, 46102-46120.

Balza-Franco, V., Paternina-Arboleda, C. D., Cantillo, V., Macea, L. F., & Ramírez-Ríos, D. G. (2017). A collaborative supply chain model for non-for-profit networks based on cooperative game theoretic. *International Journal of Logistics Systems and Management*, *26*(4), 475-496.

Zhao, Y., Wang, S., Cheng, T. E., Yang, X., & Huang, Z. (2010). Coordination of supply chains by option contracts: A cooperative game theoretic approach. *European Journal of Operational Research*, *207*(2), 668-675.

Lozano, S., Moreno, P., Adenso-Díaz, B., & Algaba, E. (2013). Cooperative game theoretic approach to allocating benefits of horizontal cooperation. *European Journal of Operational Research*, *229*(2), 444-452.

Longo, F., & Mirabelli, G. (2008). An advanced supply chain management tool based on modeling and simulation. *Computers & Industrial Engineering*, *54*(3), 570-588.

Hua, M., Lai, I. K. W., & Tang, H. (2019). Analysis of advertising and a points-exchange incentive in a reverse supply chain for unwanted medications in households based on Game Theoretic. *International Journal of Production Economics*, *217*, 259-268.

Golosova, J., & Romanovs, A. (2018, November). The advantages and disadvantages of the blockchain technology. In *2018 IEEE 6th workshop on advances in information, electronic and electrical engineering (AIEEE)* (pp. 1-6). IEEE.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Un Jumeau Numérique pour la Résilience d'un Système de Systèmes : Cas d'Application à une Ville Intelligente

MERIEM SMATI[1,2], CHRISTOPHE DANJOU[2], JANNIK LAVAL[1], VINCENT CHEUTET[1]

[1] INSA LYON, UNIVERSITE LUMIERE LYON 2, UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1, UNIVERSITE JEAN MONNET SAINT-ETIENNE, DISP UR4570, VILLEURBANNE, 69621, FRANCE
meriem.smati@insa-lyon.fr
vincent.cheutet@insa-lyon.fr
jannik.laval@univ-lyon.fr

[2] LABORATOIRE POLY-INDUSTRIE 4.0, DEPARTEMENT DE MATHEMATIQUES ET GENIE INDUSTRIEL, POLYTECHNIQUE MONTREAL, MONTREAL, QUEBEC, CANADA
meriem.smati@polymtl.ca
christophe.danjou@polymtl.ca

***Résumé* – Les villes intelligentes s'appuient sur des systèmes interconnectés et autonomes pour optimiser les opérations et améliorer la qualité de vie des citoyens. Toutefois, ces systèmes doivent être résistants aux perturbations et garantir un fonctionnement continu malgré les divers défis imprévus. Dans cet article, nous appliquons une architecture par couches proposée dans l'un de nos travaux précédents, à un cas d'utilisation de ville intelligente. Le Système de Systèmes se compose de trois systèmes constitutifs : des feux de circulation intelligents, une flotte de camions de collecte des déchets et des poubelles intelligentes. Cette étude explore le potentiel des jumeaux numériques de Systèmes de Systèmes pour l'amélioration de la résilience en s'adaptant dynamiquement aux perturbations, optimisant l'allocation des ressources et en garantissant un service ininterrompu grâce à la surveillance en temps réel et à l'analyse prédictive.**

***Abstract* – Smart cities rely on interconnected, autonomous systems to optimize operations and improve the quality of life for citizens. However, these systems must be resilient to disruptions, ensuring continuous functionality despite unforeseen challenges. In this paper, we apply a layered architecture proposed in one of our previous works, to a smart city use case. The system of systems consists of three Constituent Systems: smart traffic lights, a fleet of waste collection trucks, and smart waste bins, all integrated into an Internet of Things ecosystem. This study explores the potential of system of systems digital twins on enhancing the system's resilience by dynamically adapting to disruptions, optimizing resource allocation, and ensuring uninterrupted service through real-time monitoring and predictive analytics.**

***Mots clés* – jumeaux numériques, système de systèmes, résilience, ville intelligente, internet des objets.**
***Keywords* – digital twins, system of systems, resilience, smart city, internet of things.**

1 INTRODUCTION

Une ville intelligente est un environnement dynamique et un système de systèmes complexe où plusieurs systèmes autonomes interagissent pour atteindre de nombreux objectifs, tels que la gestion efficace des ressources, l'amélioration des services publics, l'optimisation de la qualité de vie et d'autres fonctions urbaines. Ces interactions et communications entre les Systèmes Constitutifs (CS) indépendants offrent des avantages significatifs, mais la complexité qu'elles engendrent pose également des défis majeurs, nécessitant des mécanismes de surveillance et de contrôle avancés pour garantir l'efficacité, l'adaptabilité et la résilience.

Un système de systèmes, contrairement aux systèmes monolithiques traditionnels, se caractérise par une *indépendance opérationnelle* et *managériale* [Maier, 1998], où chaque CS conserve son propre objectif et sa propre gestion tout en contribuant au système global. D'autres caractéristiques incluent la *distribution géographique*, car les CS sont souvent dispersés à différents endroits tout en restant interconnectés, le *développement évolutif*, signifiant que le système de systèmes évolue au fil du temps avec l'intégration ou la suppression de nouveaux systèmes, et le *comportement émergent*, où les interactions entre les CS conduisent à des capacités dépassant celles des systèmes individuels [Sage et Cuppan, 2001].

Les villes intelligentes illustrent parfaitement ces caractéristiques, car elles intègrent divers CSs, tels que les réseaux de transport, les réseaux énergétiques et les systèmes de gestion des déchets, dans une infrastructure unifiée et intelligente. Cependant, assurer une coordination efficace et une résilience dans un tel système de systèmes exige des solutions avancées.

La solution choisie est celle des jumeaux numériques. Un jumeau numérique est une représentation virtuelle d'un système physique, souvent appelé jumeau physique, qui reçoit en continu des données en temps réel pour simuler, prédire et optimiser ses opérations. La capacité à créer une réplique est

rendue possible grâce à une communication bidirectionnelle entre les deux entités [Grieves, 2015 ; Rauch & Pietrzyk, 2019]. Cependant, la mise en œuvre de jumeaux numériques pour un système de systèmes introduit des complexités dues à l'indépendance, à l'hétérogénéité et à l'évolutivité des CSs. Pour relever ces défis, une architecture capable de gérer des systèmes décentralisés tout en assurant une coordination efficace est nécessaire.

Dans nos travaux précédents [Smati et al., 2025], nous avons introduit une architecture en couches pour les jumeaux numériques de systèmes de systèmes (*SoS DT*), illustrée dans la (Figure 1), qui aborde les limitations et complexités mentionnées précédemment. En nous appuyant sur cette architecture, cet article présente une étude basée sur l'IoT, où le système de systèmes est une ville intelligente composée de trois CSs : des feux de circulation intelligents, une flotte de camions de collecte des déchets et des poubelles intelligentes. Le jumeau numérique du système de systèmes est exploré pour renforcer la résilience en simulant divers scénarios, en évaluant l'adaptabilité du système et en améliorant la prise de décision dans les environnements urbains.

Le reste de l'article est organisé comme suit : la section 2 passe en revue les travaux connexes, la section 3 explique l'architecture proposée précédemment. La section 4 décrit l'application de l'architecture du *SoS DT* au cas d'utilisation de la ville intelligente. La section 5 expose les scénarios potentiels et les métriques pour évaluer la résilience d'un système de systèmes. Enfin, la section 7 conclut l'article et esquisse les directions futures de recherche.

2 TRAVAUX CONNEXES

L'intersection entre les jumeaux numériques et les systèmes de systèmes a été explorée dans divers domaines, notamment dans le domaine de fabrication, des transports et de la santé. Cependant, l'application des jumeaux numériques de systèmes de systèmes de villes intelligentes est encore émergente. Des études antérieures ont mis en évidence le potentiel des jumeaux numériques pour améliorer l'efficacité, la fiabilité et la fonctionnalité des systèmes. Une analyse approfondie par [Batty et al., 2018] explore le rôle des modèles de jumeaux numériques dans la planification urbaine et la gestion de la mobilité, soulignant leur capacité à simuler les dynamiques urbaines et à optimiser les flux de transport. De même, [Bibri et Krogstie, 2019] explorent l'intersection entre les jumeaux numériques et la durabilité, en mettant l'accent sur la manière dont la gestion des déchets basée sur les jumeaux numériques peut contribuer à l'économie circulaire dans les villes intelligentes.

Dans le domaine de la gestion du trafic, des études récentes ont élargi le champ d'application des jumeaux numériques. [Rasheed et al., 2020] proposent une revue complète de la technologie des jumeaux numériques, en se concentrant sur son intégration avec l'apprentissage automatique pour l'analyse prédictive et son rôle significatif dans le développement des villes intelligentes. [Sun et al., 2020] explorent les jumeaux numériques urbains (UDT, Urban Digital Twins) et leur rôle crucial dans le développement de villes plus intelligentes, en se concentrant sur la durabilité et la planification urbaine. L'intégration des jumeaux numériques avec des tableaux de bord géospatiaux basés sur le cloud a également été explorée pour la planification de la résilience, [Chen et al., 2024] introduisent un cadre qui combine un UDT avec un tableau de bord géospatial pour visualiser les vulnérabilités des infrastructures critiques à différentes échelles spatiales et temporelles.

Malgré ces avancées, les recherches existantes n'ont pas encore proposé une approche intégrée et basée sur les jumeaux numériques pour un système de systèmes visant à renforcer la résilience des villes intelligentes. Cet article comble cette lacune en étendant les études antérieures et en démontrant comment un jumeau numérique de système de systèmes peut améliorer la prise de décision en temps réel et l'adaptabilité du système dans un contexte urbain.

3 ARCHITECTURE DE SOS DT POUR UN CAS D'UTILISATION DE VILLE INTELLIGENTE

3.1 Aperçu de l'Architecture Précédemment Proposée

Dans nos travaux précédents [Smati et al., 2025], nous avons proposé une architecture en couches pour le *SoS DT*, combinant des jumeaux numériques individuels pour chaque CS avec une couche globale de *SoS DT* pour superviser et coordonner leurs interactions. Cette architecture aborde les défis liés à l'autonomie, à l'évolutivité et au traitement des données en temps réel, la rendant adaptée à des environnements complexes comme les villes intelligentes.

Comme illustré dans la (Figure 1), elle repose sur une approche multi-jumeaux numériques où chaque CS du système de système possède son propre jumeau numérique (*DT, Digital Twin*), qui reflète le jumeau physique en utilisant des données en temps réel provenant de son support de communication (*CM, Communication Medium*) correspondant.

Le système de jumeaux numériques (*System of DTs*) est composé de jumeaux numériques ainsi que la réplique des interactions entre les CS physiques, permettant une surveillance et une analyse en temps réel. Cette approche est soutenue par

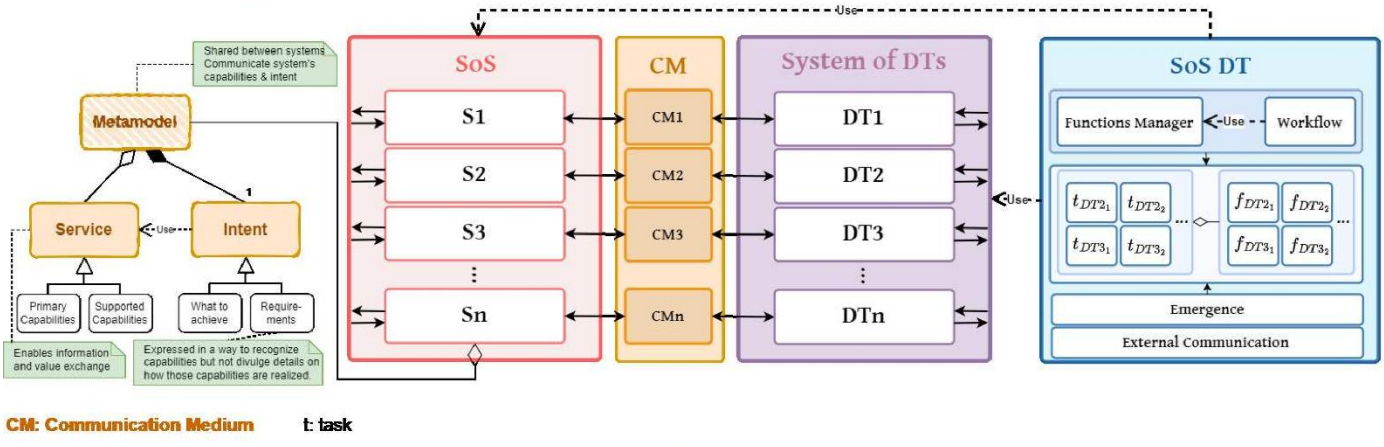


Figure 1. Architecture Proposée de *SoS DT* [Smati et al., 2025]

[Olsson et Axelsson, 2023], qui ont mis en avant les avantages d'une architecture de jumeaux numériques distribuée pour la gestion d'environnements multi-systèmes. Cependant, cela n'est possible qu'au niveau théorique, c'est pourquoi la couche globale de *SoS DT* sert d'orchestrateur du *System of DTs*, fournissant un mécanisme de contrôle intégré, facilitant un flux de données rationalisé, une allocation efficace des ressources et des opérations synchronisées au sein du jumeau numérique du système de systèmes. L'architecture proposée est conçue pour renforcer la résilience des systèmes de systèmes en offrant une surveillance en temps réel, une analyse prédictive et des réponses adaptatives aux perturbations.

3.2 Architecture du SoS DT Adaptée à un Cas d'Utilisation de Ville Intelligente

L'architecture *SoS DT* pour une ville intelligente est illustrée dans (Figure 2). Elle se compose de trois couches fondamentales :

- La couche du système de systèmes (*SoS*, *System of Systems*), qui représente les composants physiques de la ville intelligente (jumeau physique) ;
- La couche *System of DTs*, qui virtualise et numérise le jumeau physique pour permettre une surveillance en temps réel et des traitements de résilience en en utilisant les *CMs* ;
- La couche *SoS DT*, responsable de la gestion et l'orchestration des communications et des évaluations de résilience.

Cette architecture permet un comportement dynamique du système, garantissant que les opérations de la ville intelligente restent efficaces et adaptatives, même en réponse à des défaillances ou à des conditions changeantes.

Au niveau de la couche *SoS*, trois CSs interagissent pour optimiser la mobilité urbaine et la gestion des déchets :

- CS1 – Feux de circulation intelligents : régule la mobilité urbaine en ajustant les signaux lumineux en fonction de la congestion en temps réel. Ce système comprend les matériels, capteurs et technologies suivants :
  - Raspberry Pi : agit comme contrôleur local, traitant les entrées des capteurs et gérant les états des feux.
  - Kits de sockets Grove (vert, rouge, jaune) : contrôlent les signaux lumineux de manière dynamique.
  - RCWL-0516 : utilise la détection radar pour identifier la présence de véhicules et ajuster la durée des feux en conséquence.
  - Protocole MQTT : utilisé pour envoyer l'état des feux et les données de distance au CM,

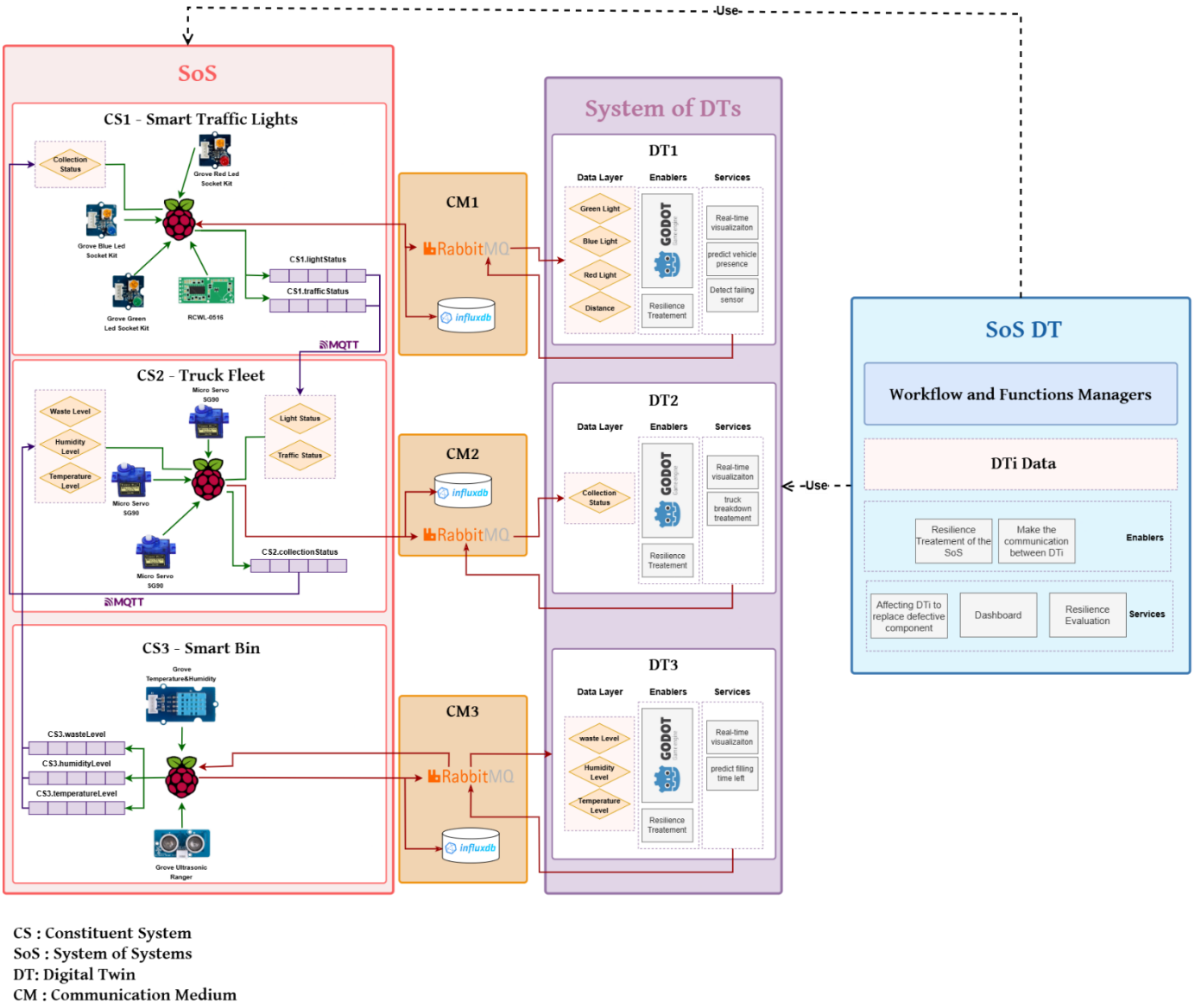


Figure 2. Architecture SoS DT Appliquée sur un Cas d'Etudes de Ville Intelligente

qui sert de tunnel entre le jumeau physique et le jumeau numérique.

- CS2 – Flotte de camions : une flotte de collecte des déchets qui optimise les itinéraires en fonction de la demande. Elle comprend les éléments suivants :
    - Raspberry Pi : contrôle la détection du niveau de déchets et gère la communication de la flotte.
    - Moteurs servo micro : représentation illustrative de trois camions en mouvement collectant les déchets.
    - Protocole MQTT : similaire à CS1, il permet la communication entre les CS et *DT2*.
- CS3 – Poubelle intelligente : ce système surveille les niveaux de remplissage des poubelles et les conditions environnementales pour optimiser les horaires de collecte. CS3 est composée des éléments suivants :
    - Raspberry Pi : collecte les données des capteurs de la poubelle et détermine si celle-ci est pleine ou non, puis envoie des notifications à CS2.
    - Capteur de distance ultrasonique Grove : détecte les niveaux de déchets en temps réel.
    - Capteur d'humidité et de température Grove : évalue les conditions environnementales à l'intérieur de la poubelle.
    - Protocole MQTT : assure que les poubelles notifient la flotte de camions lorsqu'elles atteignent leur capacité et permet la communication avec *DT3*.

Pour permettre ces fonctionnalités, chaque CS physique possède un jumeau numérique correspondant. La combinaison de ces jumeaux numériques forme le *System of DTs*. Ces jumeaux numériques individuels travaillent uniquement sur les objectifs de leurs CS respectifs.

Chaque jumeau numérique est composé de :

- Une couche de données qui reflète les conditions du monde réel.
- Des activateurs tels que des modèles d'apprentissage automatique pour l'analyse prédictive.
- Des services qui fournissent la finalité du jumeau numérique, tels que la visualisation, l'aide à la décision et le traitement de la résilience.

Le *System of DTs* comprend :

- *DT1* – jumeau numérique des feux de circulation intelligents :
    - Simule le flux de trafic et la congestion en utilisant les données en temps réel provenant de CS1.
    - Fournit une visualisation via le moteur Godot pour les décideurs.
    - Intègre un modèle de prédiction pour la présence de véhicules afin d'ajuster le flux de trafic et la congestion.
- *DT2* – jumeau numérique de la flotte de camions :
    - Simule le routage des véhicules et l'efficacité de la collecte des déchets.
    - Met en œuvre des mécanismes tolérants aux pannes pour assurer la continuité en cas de défaillances.
- *DT3* – jumeau numérique des poubelles intelligentes :
    - Simule et suit les niveaux de déchets et les conditions environnementales en temps réel.
    - Envoie des alertes lorsqu'une poubelle est pleine ou lorsque des motifs inhabituels sont détectés.
    - Soutient des stratégies prédictives de collecte des déchets.

Ces jumeaux numériques individuels interagissent dynamiquement au niveau du *SoS DT*, ce qui signifie que les changements dans un composant déclenchent des mises à jour dans les autres. Par exemple, lorsque le *DT3* détecte une poubelle pleine, il notifie le *DT2*, qui optimise ensuite les itinéraires de collecte et met à jour *DT1* pour minimiser les retards.

La couche *SoS DT* est le niveau le plus élevé de cette architecture et agit comme l'unité centrale de coordination et de prise de décision. Cette couche garantit que le *System of DTs* fonctionne de manière cohérente, en synchronisant les données en temps réel, les mécanismes de résilience et les stratégies d'optimisation.

Cette couche aborde plusieurs défis clés dans la mise en œuvre d'un jumeau numérique de système de systèmes résilient, notamment la puissance de calcul et l'évolutivité, car l'architecture découple les tâches intensives en calcul des jumeaux numériques individuels. Au lieu d'exécuter chaque calcul lourd au niveau des jumeaux numériques, la couche *SoS DT* extrait uniquement les processus, tâches et fonctions nécessaires.

Au sein de cette couche, le module de gestion de données des DT_i agit comme le référentiel et l'unité de traitement des données centrales, en soutenant :

- La prise de décision en temps réel en exploitant les données historiques et les résultats des DT_i nécessaires pour accomplir la tâche correspondante.
- L'évaluation de la résilience.

4 SCENARIOS

Cette section explore les scénarios qui seront abordés dans la mise en œuvre de l'architecture *SoS DT*, où le jumeau numérique du système de systèmes renforce la résilience dans un cas d'utilisation de gestion des déchets d'une ville intelligente en répondant dynamiquement aux perturbations. Chaque scénario décrit un défi, l'intervention du *SoS DT* et le résultat final, démontrant l'adaptabilité et l'efficacité du système, tout en prenant en compte les capacités et propriétés de résilience. Dans ce contexte, nous définissons une *Capacité* comme la capacité d'un système à accomplir certaines fonctions ou à répondre à des défis ; une *Propriété*, quant à elle, fait référence aux caractéristiques ou attributs inhérents d'un système qui influencent sa résilience.

Les propriétés de la résilience sont [Bruneau et al., 2003 ; Liu et al., 2022 ; Hosseini et al., 2016] :

- Robustesse : capacité d'un élément à résister à la propagation des dommages et à ne pas subir de dégradation en présence d'un événement perturbateur. Elle est considérée comme l'une des propriétés les plus importantes de la résilience.
- Rapidité : vitesse à laquelle un système peut revenir à son état initial et atteindre ses objectifs, ou du moins à un niveau de fonctionnalité acceptable, après une perturbation.
- Ingéniosité : capacité d'un système à utiliser des ressources externes provenant d'un autre système ou de l'environnement externe pour se remettre sur la bonne voie.

- Redondance : c'est également l'une des propriétés de la résilience, mais ce n'est pas la caractéristique que nous recherchons, mais plutôt une solution plus rentable.

Et les capacités de résilience sont [Francis et Bekera, 2024] :

- Capacité d'absorption : "la capacité du système à absorber les perturbations et à se réorganiser tout en subissant des changements afin de conserver essentiellement la même fonction, structure, identité et rétroactions. Cela peut également être vu comme la capacité à résister aux chocs et à maintenir ses fonctions".
- Capacité d'adaptation : "la capacité du système à s'adapter aux changements internes ou externes en modifiant ses pratiques, politiques et règles pour faire face aux perturbations. Cela peut également être vu comme la capacité à apprendre et à s'adapter".
- Capacité de récupération/restauration : "la capacité du système à se rétablir rapidement après un impact. Cela inclut la mise en œuvre de comportements de réponse visant à renforcer la capacité à résister aux perturbations ou à se rétablir aussi rapidement que possible après un impact. La capacité de récupération peut être compromise si des investissements inadéquats sont réalisés en raison de désaccords entre les parties prenantes".

4.1 Scénario 1 : Pluie intense perturbant la précision des capteurs

Un cas qui sera considéré pour ce premier scénario est une pluie soudaine et intense qui affecterait le CS3, où les propriétés et capacités de résilience démontrées seront la **robustesse**, l'**absorption** et l'**adaptation**.

Le capteur de distance ultrasonique Grove dans la poubelle, responsable de détecter les niveaux de déchets, commence à fournir des mesures incohérentes ou peu fiables en raison de l'accumulation excessive d'eau. Bien que le Raspberry Pi présent dans CS3 détecte les écarts dans les lectures des capteurs, le traitement local seul est insuffisant pour résoudre le problème. *DT3* analyse les modèles passés d'accumulation des déchets et les conditions environnementales, lui permettant d'estimer les niveaux de remplissage lorsque les mesures directes des capteurs ne sont pas fiables.

La couche *SoS DT* intervient en ajustant les horaires de collecte des déchets en se basant sur les capacités estimées des poubelles plutôt que sur les données des capteurs en temps réel, et extrait les informations qui doivent être communiquées au *DT2*. Le *DT2* reçoit les priorités de collecte mises à jour, garantissant que les poubelles susceptibles d'être pleines sont traitées en premier. Parallèlement, le *SoS DT* envoie une alerte pour avertir l'équipe de maintenance de réparer les poubelles affectées.

La robustesse est validée par la capacité du système de systèmes à résister aux défaillances des capteurs en mettant en œuvre des méthodes alternatives grâce au *SoS DT*. Les capacités de résilience incluent l'absorption des perturbations en passant à des modèles d'estimation et l'adaptation en ajustant dynamiquement les priorités de collecte.

4.2 Scénario 2 : Panne de courant affectant les feux de circulation intelligents

Dans ce scenario, une panne de courant perturbe le fonctionnement du CS1, augmentant le risque d'embouteillages et d'accidents de la route. La propriété de **rapidité** et la capacité d'**adaptation** sont prises en compte.

Le Raspberry Pi correspondant de ce CS détecte la perte de provenance des données, et sur cette base, le *SoS DT* envoie des notifications au CS2 et active des règles de trafic locales préconfigurées stockées sur chaque Raspberry Pi affecté. Pendant ce temps, le *DT2* évalue les retards potentiels causés par les intersections non contrôlées et ajuste les itinéraires des camions de collecte des déchets en conséquence.

Cette intervention démontre la rapidité, car le système passe rapidement en mode de secours, et l'adaptation, car le flux de trafic est réorganisé en attendant le rétablissement complet de l'alimentation électrique.

4.3 Scénario 3 : Panne mécanique d'un véhicule de collecte des déchets

Ce troisième scénario se produit lors d'une tournée de collecte programmée, où un camion de collecte des déchets dans CS2 subit une panne moteur, entraînant divers problèmes tels qu'une interruption du service et un risque de congestion routière. La propriété d'**ingéniosité** et la capacité de **récupération** sont prises en compte.

La défaillance est détectée et l'information est immédiatement transmise au *DT2*, qui informe à son tour la couche *SoS DT*. Cette dernière met en œuvre une stratégie de résilience reposant sur deux actions clés : premièrement, le *DT2* réaffecte les tâches de collecte restantes du camion défaillant à d'autres véhicules opérationnels, garantissant ainsi que l'ensemble des bacs à déchets sont pris en charge ; deuxièmement, le *DT1* ajuste les cycles des feux de signalisation à proximité afin de minimiser la congestion causée par le véhicule immobilisé, évitant ainsi des perturbations secondaires.

Ce scénario illustre la propriété d'ingéniosité, puisque les ressources du système sont redistribuées pour pallier la panne du camion, ainsi que la capacité de récupération, puisque les opérations de collecte reprennent efficacement malgré la défaillance.

5 METRIQUES DE RESILIENCE

La résilience est une exigence fondamentale pour garantir la continuité des services, l'adaptabilité aux perturbations et une gestion efficace des ressources. Les villes intelligentes fonctionnent comme des systèmes de systèmes, où une défaillance dans un sous-système peut se propager et impacter l'ensemble de l'infrastructure. Dans cette section, nous présentons les métriques de résilience utilisées pour évaluer l'efficacité du *SoS DT* dans l'amélioration de la résilience du système de systèmes physique. L'évaluation réalisée grâce à ces métriques permet de quantifier les bénéfices apportés par les jumeaux numériques à la résilience du système de systèmes et d'adopter une approche structurée pour mesurer leur impact.

Pour évaluer la résilience, plusieurs métriques clés sont considérées et résumées dans le (Tableau 1). Les précisions sur les métriques à maximiser, minimiser ainsi que leurs interprétations sont détaillées ci-dessous :

- L'Indice de Robustesse (RI) est à maximiser, car une valeur élevée indique une meilleure résistance à la dégradation des performances.
- L'Efficacité de l'Ingéniosité (RE) doit être améliorée afin d'éviter les inefficacités tout en garantissant une réponse efficace en cas de crise.
- La Rapidité (R) doit être minimisée, car des temps de récupération longs peuvent entraîner des interruptions prolongées des services.

En plus des propriétés de résilience, les capacités de résilience sont également prises en compte dans les métriques. Les capacités absorptive, adaptative et de récupération doivent être renforcées afin de prévenir des pertes significatives de performance, assurer une flexibilité dans la réponse aux perturbations et réduire au maximum le temps d'indisponibilité.

En complément des propriétés et capacités de résilience, des métriques de performance propres à chaque CS permettent une évaluation plus granulaire :

- L'Efficacité du Flux de Trafic (TFE) doit être optimisée pour réduire la congestion et améliorer la mobilité urbaine.
- Le Taux de Succès de Collecte (CSR) doit être augmenté afin de garantir une haute qualité de service et assurer un environnement urbain plus propre.
- La Précision du Niveau de Remplissage (FLA) doit être améliorée en réduisant les écarts entre les niveaux détectés et réels, permettant une prise de décision optimisée en matière de collecte des déchets. Plus les mesures des capteurs sont précises, plus le système peut anticiper et répondre efficacement aux besoins de gestion des déchets.

Tableau 1. Métiques de Résilience d'un Système de systèmes

Catégories	Métriques	Définition	Formule
Propriétés de Résilience	Indice de Robustesse (RI)	Capacité à résister aux perturbations sans dégradation des performances.	$RI = \frac{Q_{post}}{Q_{pre}}$ Q_{pre}: Niveau de performance avant la perturbation. Q_{post}: Niveau de performance après l'application de la méthode de résilience.
	Efficacité d'Ingéniosité (RE)	Aptitude à utiliser efficacement les ressources disponibles en période de crise.	$RME = \frac{Res_{utilized}}{Res_{available}}$ $Res_{utilized}$: Ressources utilisées pour atténuer les perturbations. $Res_{available}$: Ressources totales disponibles.
	Rapidité (R)	Durée nécessaire pour passer d'un état instable à un état stable.	$R = t_{recovery} - t_{disruption}$ $t_{recovery}$: Temps auquel le système retrouve sa stabilité. $t_{disruption}$: Temps auquel la perturbation se produit.
Capacités de Résilience	Capacité Absorptive	Capacité du système à minimiser la dégradation des performances face aux perturbations.	$Capacity_{absorb} = \frac{Q_{pre} - Q_{min}}{Q_{pre}}$ Q_{min}: Niveau de performance le plus bas atteint pendant la perturbation.
	Capacité Adaptative	Aptitude à modifier les fonctions en réponse à de nouvelles conditions.	$Capacity_{adapt} = \frac{Q_{new}}{Q_{pre}}$ Q_{new}: Niveau de performance après l'application de la capacité.
	Capacité de Récupération	Efficacité dans le retour à une fonctionnalité complète après une perturbation.	$Capacity_{recover} = \frac{Q_{post} - Q_{min}}{t_{recovery}}$
Métriques de Performance Metrics (par CS)	CS1 – Efficacité du Flux de Trafic	Efficacité de la réduction de la congestion.	$TFE = \frac{V_{free} - V_{congested}}{V_{free}}$ V_{free}: Vitesse optimale du véhicule en conditions de circulation fluide. $V_{congested}$: Vitesse réelle du véhicule en situation de congestion.
	CS2 – Taux de Succès de Collecte	Évalue l'efficacité de la collecte des déchets.	$CSR = \frac{B_{collected}}{B_{expected}}$ $B_{collected}$: Nombre réel de poubelles vidées. $B_{expected}$: Nombre de poubelles attendues à être vidés.
	CS3 – Précision du Niveau de Remplissage	Évalue la fiabilité des capteurs dans la détection du niveau de remplissage des déchets.	$FLA = 1 - \frac{\lvert F_{detected} - F_{actual} \rvert}{F_{actual}}$ F_{actual}: Niveau de remplissage détecté par le capteur. $B_{expected}$: Niveau de remplissage réel.

6 CONCLUSION

Cette étude a appliqué l'architecture *SoS DT* proposée dans l'amélioration de la résilience des systèmes de systèmes à une infrastructure de ville intelligente. En exploitant cette architecture multicouches, ce travail a illustré comment les jumeaux numériques peuvent s'adapter dynamiquement aux perturbations, optimiser l'allocation des ressources et assurer la continuité des services dans des environnements complexes, en faisant un outil adapté pour garantir et renforcer la résilience.

Le cas d'usage étudié était un système de systèmes composé de trois systèmes constitutifs : des feux de signalisation intelligents, des flottes de camions de collecte des déchets et des bacs intelligents. Cette étude a permis d'apporter une application concrète de l'approche proposée, en mettant en évidence son potentiel pour répondre aux défis réels et concevoir des jumeaux numériques adaptés.

Malgré ces avancées, plusieurs défis et perspectives de recherche restent ouverts. L'un des principaux défis concerne l'évolutivité. Bien que cette étude ait exploré un nombre limité de CS, les travaux futurs devraient analyser comment l'architecture proposée peut s'adapter à des cas d'usage plus vastes et diversifiés. Une solution potentielle repose sur la modularité de l'architecture, mais une question clé reste à résoudre : « Comment un jumeau numérique d'un CS nouvellement intégré peut-il être conçu et inclus dans le jumeau numérique de système de systèmes ? »

Un autre axe de recherche important est l'implémentation pratique de l'architecture *SoS DT* de la ville intelligente, afin d'obtenir des résultats numériques et empiriques à partir des métriques définies. Cela permettrait une analyse comparative de la résilience du système de systèmes avec et sans intégration des jumeaux numériques, fournissant ainsi des preuves quantitatives de leur impact sur la résilience.

En conclusion, cette recherche a posé des bases solides pour l'utilisation des jumeaux numériques dans l'amélioration de la résilience des systèmes de systèmes. En relevant les défis identifiés et en élargissant le champ de cette étude, les avancées futures permettront d'affiner et d'optimiser davantage le paradigme du jumeau numérique de système de systèmes, contribuant ainsi au développement d'environnements plus adaptatifs et résilients.

7 REFERENCES

Grieves, Michael. (2015). Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication.

Smati, M., Cheutet, V., Danjou, C., & Laval, J. (2025). Digital Twin System of Systems: A Layered Architecture Proposal. In Proceedings of the 13th International Conference on Model-Based Software and Systems Engineering.

Rauch, L., & Pietrzyk, M. (2019). Digital twins as a modern approach to design of industrial processes. *Journal of Machine Engineering*, *19*.

Maier, M. W. (1998). Architecting principles for systems-of-systems. *Systems Engineering: The Journal of the International Council on Systems Engineering*, *1*(4), 267-284.

Batty, M., Axhausen, K. W., Giannotti, F., & al. (2012). *Smart cities of the future*. *European Physical Journal Special Topics*, *214*(1), 481–518.

Olsson, T., & Axelsson, J. (2023, June). Systems-of-systems and digital twins: A survey and analysis of the current knowledge. In *2023 18th Annual System of Systems Engineering Conference (SoSe)* (pp. 1-6). IEEE.

Sage, A. P., & Cuppan, C. D. (2001). On the systems engineering and management of systems of systems and federations of systems. *Information knowledge systems management*, *2*(4), 325-345.

Chen, C., Han, Y., Galinski, A., Calle, C., Carney, J., Ye, X., & van Westen, C. (2024). Integrating urban digital twins with cloud-based geospatial dashboards for coastal resilience planning: A case study in Florida. *arXiv preprint arXiv:2403.18188*.

Bibri, S. E., & Krogstie, J. (2017). Smart sustainable cities of the future: An extensive interdisciplinary literature review. *Sustainable cities and society*, *31*, 183-212.

Rasheed, A., San, O., & Kvamsdal, T. (2020). Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective. *IEEE access*, *8*, 21980-22012.

Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., ... & Von Winterfeldt, D. (2003). A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake spectra*, *19*(4), 733-752.

Liu, W., Shan, M., Zhang, S., Zhao, X., & Zhai, Z. (2022). Resilience in infrastructure systems: A comprehensive review. *Buildings*, *12*(6), 759.

Hosseini, S., Barker, K., & Ramirez-Marquez, J. E. (2016). A review of definitions and measures of system resilience. *Reliability Engineering & System Safety*, *145*, 47-61.

Francis, R., & Bekera, B. (2014). A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems. *Reliability engineering & system safety*, *121*, 90-103.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
L'Intelligence Artificielle pour l'Evaluation et l'Optimisation de l'Empreinte Carbone des Services Numériques

BOUKHALFA ZAHOUT[1], YAHIA CHABANE[1], VINCENT DROUARD[1], LIONEL METIVIER[1]

[1] Conserto LABS
8 Impasse Serge Reggiani - 44800 SAINT-HERBLAIN, France
(boukhalfa.zahout ; yahia.chabane ; vincent.drouard ; lionel.metivier)@conserto.pro

***Résumé* – Le développement exponentiel du web s'accompagne d'une augmentation significative de la consommation énergétique, soulevant d'importants défis en matière de durabilité. Avant d'engager une démarche d'écoconception, il est essentiel d'évaluer rigoureusement l'empreinte environnementale des services numériques, afin d'identifier les leviers les plus efficaces pour réduire leur impact.**

De nombreuses approches, open-source ou propriétaires, existent pour évaluer l'empreinte environnementale des services numériques. Cependant, ces méthodes fournissent-elles des estimations fiables ? Surestiment-elles ou sous-estiment-elles l'impact réel en termes de consommation d'énergie et d'empreinte carbone ?

Cet article se concentre sur l'évaluation de la consommation énergétique et de l'empreinte carbone des sites web en comparant deux approches : les mesures en temps réel et la modélisation. Une étude expérimentale est menée pour comparer les performances des approches basées sur la modélisation, afin d'identifier celle qui est la plus proche des mesures en temps réel. Nous proposons également EcoByteIA, un modèle prédictif basé sur l'apprentissage supervisé, conçu pour affiner les estimations environnementales. Les résultats expérimentaux montrent que notre approche réduit significativement les écarts observés par rapport aux mesures de référence, ouvrant de nouvelles perspectives pour une évaluation plus fiable et l'optimisation de l'empreinte carbone des services numériques.

***Mots clés* - Services Numériques, Consommation Énergétique, Empreinte Carbone, Machine Learning, Modélisation.**

1 INTRODUCTION

Aujourd'hui, la diffusion et l'échange d'informations se font principalement par le biais de la technologie numérique. Cette révolution repose sur des infrastructures physiques et logicielles, notamment les serveurs, les réseaux et les services numériques, qui consomment d'importantes ressources naturelles. La fabrication des infrastructures matérielles nécessite l'extraction et le raffinage de métaux, tandis que l'ensemble de l'écosystème numérique repose sur une consommation énergétique croissante. Selon une étude de GreenIT.fr, le bilan énergétique global du numérique, incluant l'énergie grise nécessaire à la fabrication des équipements, est passé d'environ 3 400 TWh en 2010 à une projection de 10 000 TWh en 2025 (GreenIT.fr, 2019). Cette croissance exponentielle met en évidence les défis énergétiques majeurs liés à l'essor du numérique à l'échelle mondiale.

Le secteur des Technologies de l'information et de la communication (TIC) représentait environ 4% de la consommation mondiale d'électricité en 2020 (Malmodin J. L., 2024). Parmi ces usages, les centres de données à eux seuls consomment 1 % de l'énergie mondiale, soit plus que la consommation nationale d'énergie de nombreux pays (Masanet, 2020).

Le secteur numérique représente déjà 4 % de l'empreinte carbone mondiale (Bordage F, 2019), et ce chiffre pourrait doubler d'ici 2025. En France, il contribue actuellement à 4.4% de l'empreinte carbone nationale, avec une augmentation de 80 % de la consommation d'électricité d'ici 2050 (Adem, 2025). Ces tendances soulignent l'urgence d'une réduction significative de l'empreinte carbone des services numériques, afin d'identifier des leviers d'optimisation.

Le mode de vie numérique moderne, marqué par une dépendance accrue aux services et applications en ligne, connaît une expansion rapide. Parmi ces services, les sites web représentent l'une des solutions les plus utilisées. Aujourd'hui, le nombre d'utilisateurs d'internet dépasse les 5 milliards, et environ 2 milliards de sites web sont recensés (Siteefy, 2025). Cependant, cette croissance fulgurante engendre des incidences environnementales souvent invisibles, mais cruciales, qu'il est impératif de comprendre pour assurer une transition réussie vers une économie verte.

La pandémie de COVID-19 a profondément transformé nos modes de travail, en favorisant le télétravail, ce qui a entraîné une utilisation accrue du web et une empreinte carbone croissante. Si cette tendance se poursuit, notamment avec la généralisation du télétravail, l'empreinte carbone mondiale pourrait atteindre 34,3 millions de tonnes de CO_2 (Obringer, 2021). L'absorption de ces émissions nécessiterait une forêt deux fois plus grande que la superficie du Portugal (Obringer, 2021).

Pour construire un monde numérique durable, il est essentiel d'évaluer avec précision l'empreinte carbone des services numériques. Une estimation incorrecte peut fausser la perception des efforts nécessaires à la réduction de cet impact. Si l'empreinte carbone est surestimée, les entreprises et les particuliers risquent de croire que leurs actions ont un effet négligeable, ce qui peut les démotiver et freiner les initiatives en faveur de la durabilité. À l'inverse, si elle est sous-estimée, l'impact réel semble insignifiant, incitant ainsi à ne pas entreprendre d'efforts pour le réduire. Ainsi, une évaluation rigoureuse et fiable est indispensable pour orienter efficacement les stratégies de réduction de l'empreinte carbone du numérique.

Calculer cette empreinte représente cependant un véritable défi. Lorsqu'on examine le cycle de vie complet d'un service numérique, l'analyse devient rapidement complexe. Comment prendre en compte l'énergie spécifique et les matériaux nécessaires à sa fabrication ? Quelle quantité d'énergie est requise pour assurer l'hébergement web, à travers des serveurs, des conteneurs cloud et des réseaux de diffusion de contenu ? Comment mesurer la demande énergétique des utilisateurs finaux, qui interagissent avec ces services sur divers appareils au fil du temps ?

Ces questions sont complexes et ne possèdent pas de réponses universelles. Les services numériques sont constitués de nombreux éléments appartenant à des systèmes complexes, chacun ayant ses propres exigences en énergie et en ressources. À ce jour, il n'existe pas de consensus scientifique sur la manière de mesurer précisément l'empreinte carbone des services numériques.

Face à ces incertitudes méthodologiques, il est crucial de développer des modèles plus précis et adaptés aux spécificités du numérique, afin d'orienter efficacement les stratégies de réduction d'empreinte carbone. Cet article propose une approche empirique permettant d'évaluer la précision et la pertinence de certaines méthodes actuelles de calcul de l'empreinte carbone. Notre objectif est d'aider les développeurs web à réduire l'empreinte carbone des sites web et d'accompagner ceux qui souhaitent concevoir des outils de mesure adaptés aux enjeux du numérique.

La suite de cet article est organisée comme suit : la section 2 présente les travaux connexes sur l'évaluation de la consommation d'énergie et de l'empreinte carbone, en détaillant deux types d'approches pour mesurer l'énergie consommée à l'utilisation et l'empreinte carbone des sites web. Dans la section 3, nous introduisons une nouvelle approche basée sur le machine learning. La section 4 propose une discussion sur les performances des modèles étudiés et du modèle proposé. Enfin, la section 5 conclut l'article et suggère des orientations pour les recherches futures.

2 TRAVAUX CONNEXES

De nombreuses études ont été menées pour évaluer l'impact environnemental des services numériques, notamment en ce qui concerne le stockage, le transfert et l'utilisation des données (Malmodin J. &., 2018). Les avancées technologiques, l'amélioration de l'efficacité énergétique du web et les évolutions de l'approvisionnement énergétique mondial rendent nécessaire une mise à jour régulière des estimations existantes. Toutefois, une évaluation exhaustive de l'empreinte environnementale du web ne peut se restreindre à la seule analyse de l'empreinte carbone (Ristic, 2019).

Dans le cadre de la création d'outils d'affichage environnemental, la Commission européenne a défini la méthode Product Environmental Footprint (PEF), qui propose 16 indicateurs standardisés pour quantifier l'impact environnemental d'un produit (européenne, 2013-2018). Ces directives s'intègrent au cadre réglementaire de l'Union européenne ainsi qu'aux législations françaises, notamment la loi Climat et Résilience, l'article 13 de la loi AGEC et l'article 35 de la loi REEN.

Cependant, dans le secteur du numérique, cinq indicateurs sont couramment retenus pour évaluer les impacts environnementaux (Bordage, 2019) :

- **Gaz à effet de serre (GES)** : exprimés en équivalent CO_2 (eq. CO_2), cet indicateur mesure l'impact des émissions sur le réchauffement climatique et reste central dans l'évaluation environnementale.
- **Énergie primaire (EP)** : exprimée en mégajoules (MJ), elle représente l'énergie totale nécessaire à la production de l'énergie finale utilisée.
- **Consommation d'électricité (ELEC)** : exprimée en kilowattheures (kWh), cet indicateur mesure directement l'énergie consommée par les équipements numériques.
- **Consommation d'eau (EAU)** : exprimée en litres ou en mètres cubes (l ou m^3), cet indicateur reflète l'impact sur les ressources hydriques.
- **Ressources abiotiques (ADP)** : exprimées en kilogrammes équivalent antimoine (kg eq. Sb), elles mesurent l'utilisation des ressources naturelles non renouvelables, telles que les minerais.

L'évaluation de l'impact environnemental étant multicritère par nature, l'analyse simultanée de ces indicateurs reste un défi méthodologique. Dans ce contexte, nous avons choisi de nous concentrer dans un premier temps sur l'empreinte carbone. Ce choix ne repose pas sur une hiérarchisation des impacts, mais sur la richesse des données disponibles et la maturité des contributions scientifiques existantes dans ce domaine.

Ainsi, dans cet article, nous nous focalisons principalement sur l'évaluation de l'empreinte carbone des sites web, tout en ayant conscience de la nécessité future d'intégrer les autres indicateurs pour une approche multicritère plus complète.

2.1 Approches pour évaluer la consommation d'énergie et l'empreinte carbone des services numériques

Un service numérique correspond à une activité mobilisant des logiciels, du matériel, des réseaux, des infrastructures et d'autres ressources numériques, permettant de capturer, transmettre, traiter, analyser, présenter et stocker des données. Ces composants sont organisés selon une architecture à trois niveaux (ou multi-niveaux), incluant trois couches principales : serveur, réseau et utilisateur. Chaque couche est gérée par des outils logiciels permettant d'assurer les fonctionnalités nécessaires. Malgré leur dépendance aux infrastructures physiques (serveurs, réseaux, terminaux utilisateurs), les services numériques restent immatériels et éphémères (Ademe, 2023).

L'évaluation de la consommation d'énergie et de l'empreinte carbone des services numériques adopte un périmètre d'analyse large, intégrant tous les facteurs influençant leur impact environnemental. Ces analyses segmentent les résultats en trois sous-systèmes, permettant une vision plus détaillée des contributions respectives (Ademe, 2023) :

1. **Centres de données** : Énergie consommée pour l'hébergement, le stockage et la distribution des données.
2. **Réseaux** : Énergie consommée par les infrastructures de transmission des données, incluant les routeurs, commutateurs et antennes relais.
3. **Appareils utilisateurs** : Énergie consommée pour l'exécution des services numériques sur les terminaux finaux (ordinateurs, smartphones, tablettes, etc.).

La répartition de la consommation énergétique des services numériques entre les trois couches (serveur, réseau et utilisateur) est présentée dans le ***Tableau 1***, sur la base des travaux de l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA, 2023), ainsi que les travaux de recherche (SG Andrae, 2020) et (Malmodin J. L., 2024).

Nous avons identifié deux principales approches permettant d'évaluer la consommation énergétique et l'empreinte carbone : les mesures en temps réel et la modélisation. Chaque

méthode présente des avantages et des limites, en fonction de l'échelle d'analyse, du niveau de précision souhaité et des objectifs de l'évaluation, comme illustré dans la ***Figure 1***.

Tableau 1. Répartition de la consommation énergétique entre les principales couches du système numérique.

Couche	Part de l'énergie totale
Centres de données	22%
Réseaux	24%
Appareils utilisateurs	54%

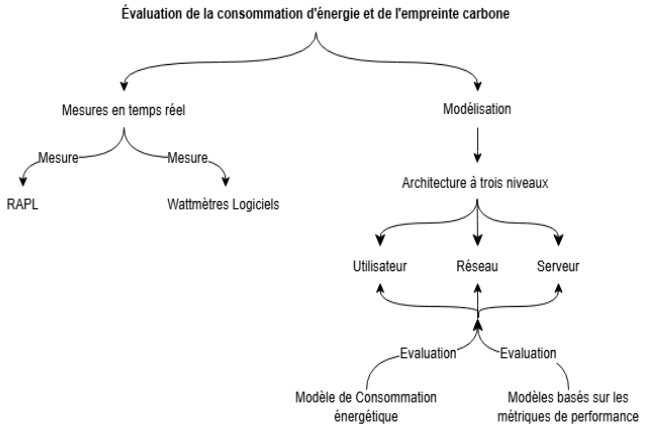


Figure 1. Une Synthèse des approches permettant d'évaluer la consommation d'énergie et l'empreinte carbone des services numériques.

2.1.1 Mesures en temps réel

Les mesures en temps réel offrent des données précises en surveillant directement la consommation énergétique des services numériques. Cependant, leur mise en œuvre peut être particulièrement coûteuse en ressources, notamment pour l'analyse de sites web comptant des centaines, voire des milliers de pages. De plus, ce processus mobilise des ressources matérielles conséquentes (processeur, mémoire vive, bande passante), ce qui peut accroître la consommation énergétique globale. Deux principales approches de mesure en temps réel se distinguent : RAPL et les wattmètres logiciels :

- **RAPL (Running Average Power Limit Energy Reporting)** : Cette interface interne permet de mesurer directement la consommation énergétique des composants matériels, notamment le processeur, la mémoire et la carte graphique. Bien qu'elle fournisse des données détaillées, son utilisation requiert un accès au niveau du système, ce qui limite sa généralisation (intel, 2024).
- **Wattmètres Logiciels** : Ces outils exploitent les données fournies par RAPL pour mesurer la consommation énergétique à un niveau plus global. Ils offrent des informations précieuses sur la consommation d'énergie des processus, conteneurs et machines virtuelles, ce qui les rend particulièrement adaptés à l'analyse d'infrastructures complexes (Zahout, 2022).

Ces approches permettent une analyse détaillée de la consommation d'énergie et de l'empreinte carbone de chaque composant, offrant ainsi une vision fine de l'empreinte carbone des services numériques.

2.1.2 Modélisation

La modélisation offre une alternative flexible et évolutive pour l'évaluation de l'empreinte carbone des services numériques, notamment pour les sites web comportant un grand nombre de pages. Cette approche repose sur des métriques et des hypothèses prédéfinies permettant d'estimer la consommation énergétique et l'empreinte carbone des services numériques. Bien que moins précise que les mesures en temps réel en raison de sa dépendance aux calculs des valeurs moyennes à l'instant *t*, elle permet d'effectuer des analyses à grande échelle et avec une moindre consommation de ressource (Zahout, 2022). Nous classons les modèles de modélisation en deux grandes catégories :

- **Modèles basés sur les métriques de performance** : Ces modèles estiment l'empreinte carbone en fonction de paramètres tels que la taille du DOM (Document Object Model), le nombre de requêtes http et le volume de données transférées.
- **Modèles de consommation énergétique** : Ces modèles calculent des consommations énergétiques, puis convertissent ces données en empreinte carbone à l'aide de facteurs de conversion spécifiques, tels que le mix énergétique régional.

L'approche de modélisation analyse le système dans son ensemble et répartit la consommation d'énergie totale ainsi que l'empreinte carbone des services numériques entre les trois couches de l'architecture numérique : les appareils des utilisateurs finaux, les réseaux et les centres de données. En attribuant une part proportionnelle de l'empreinte global à chaque niveau (*voir* ***Tableau 1***), ces méthodes fournissent une estimation statique de l'empreinte carbone. La consommation énergétique et l'empreinte carbone est généralement divisée en deux catégories (Malmodin J. L., 2024) :

- **L'empreinte liée à l'utilisation des équipements** : l'empreinte carbone liée à l'utilisation est directement influencée par la consommation énergétique des équipements. Cette consommation peut être exprimée en kilowattheures (kWh) ou convertie en équivalents CO_2 , en fonction des études. La conversion des kWh en CO_2 varie selon le mix énergétique propre à chaque pays, qui repose sur une combinaison de sources renouvelables et fossiles (**solaire, éolien, charbon, etc.**) (ElectricityMaps, 2025)
- **L'empreinte liée à leur production, souvent appelée énergie grise** : l'empreinte carbone liée à la production représente une consommation fixe, calculée avant même l'utilisation des équipements. Elle inclut les processus d'extraction des matières premières, de fabrication, de transport et de fin de vie des équipements. Cette empreinte est généralement estimée à partir des fiches environnementales des fabricants. Toutefois, la fiabilité de ces données peut poser des contraintes méthodologiques, car les estimations varient selon les sources et les technologies utilisées.

L'évaluation de ces empreintes repose d'abord sur l'analyse de l'énergie consommée par les appareils lors de leur fabrication et de leur utilisation. Ces données énergétiques sont ensuite converties en empreinte carbone via un facteur d'intensité carbone. Les travaux de (Malmodin J. L., 2024) fournissent une répartition détaillée des contributions de ces couches, illustrée dans le ***Tableau 2***.

Plusieurs approches de mesure en temps réel et de modélisation sont disponibles en open-source. Les travaux (Moulierac, 2023) recensent différents modèles qui prennent en compte soit uniquement l'empreinte liée à l'utilisation, soit les deux types d'empreinte (utilisation et production). Lorsqu'un modèle intègre l'empreinte de production, celle-ci peut concerner l'ensemble des équipements numériques ou se

limiter à certains composants spécifiques. De plus, ces modèles diffèrent selon leur prise en compte de l'infrastructure réseau :

Tableau 2. Répartition d'empreinte carbone d'utilisation et production pour chaque couche.

	Centres de données	Réseaux	Appareils utilisateur
Utilisation	82%	82%	49%
Production	18%	18%	51%

- Certains incluent à la fois les réseaux mobiles et fixes,
- Tandis que d'autres se concentrent sur une technologie spécifique.

Enfin, en ce qui concerne les équipements utilisateurs, certains modèles analysent un seul type d'appareil (ex. : ordinateur portable, téléviseur ou smartphone), alors que d'autres adoptent une approche plus globale en prenant en compte plusieurs catégories d'équipements.

Dans cette étude, nous nous intéressons à une approche de mesure en temps réel à l'aide du wattmètre logiciel PowerAPI (powerapi, 2025), ainsi que sur cinq modèles de modélisation que nous ne détaillons pas ici : 1byte (Ferreboeuf, 2018), Dimpact (Johnston, 2022), SWDM (Sustainable Web Design Model, 2025) et CARBONTRUST (Stephens, 2021).

Ces modèles ont été sélectionnés car ils évaluent la consommation d'énergie à l'utilisation et reposent sur des métriques d'entrée communes, notamment :

- Le volume de données transférées,
- Les constantes d'intensité énergétique appliquées aux couches utilisateur, réseau et serveur, exprimées en kWh/byte ou kWh/h,
- L'intensité carbone, utilisée pour convertir la consommation énergétique totale en empreinte carbone, en agrégeant les contributions de chaque couche.

Afin d'illustrer leur fonctionnement, nous appliquons ces modèles à l'estimation de la consommation énergétique et de l'empreinte carbone pour un transfert de 1 GiB de données sur une durée de 1 heure, en considérant un laptop comme appareil utilisateur et une connexion filaire. Les résultats obtenus sont présentés dans les ***Figure 2*** et ***Figure 3***. Ces figures présentent respectivement la répartition de la consommation énergétique (en kWh) et de l'empreinte carbone (en gCO_2 eq) par couche du système numérique (serveur, réseau et utilisateur) selon différentes méthodes d'estimation (1byte, Dimpact, SWDM et CARBONTRUST).

Les résultats montrent une variabilité significative entre les modèles étudiés, tant en termes de consommation énergétique que d'empreinte carbone. Le modèle 1byte affiche les valeurs les plus élevées, notamment en raison d'une estimation plus importante de l'énergie consommée par la couche utilisateur et réseau, tandis que Dimpact et CARBONTRUST présentent les estimations les plus faibles. La répartition de la consommation énergétique diffère selon les modèles, avec une prédominance de l'énergie consommée par l'utilisateur pour 1byte et SWDM, tandis que SWDM et CARBONTRUST attribuent une part plus importante au utilisateurs finaux. L'empreinte carbone suit globalement la même tendance que la consommation énergétique.

Ces modèles reposent principalement sur une approche descendante, où la consommation énergétique totale et le volume de transfert de données à l'échelle mondiale sont d'abord estimés, avant d'être répartis entre les trois couches du système numérique. Cependant, cette méthodologie soulève des limites, notamment en raison des incertitudes liées à la répartition des impacts et au manque de granularité des mesures.

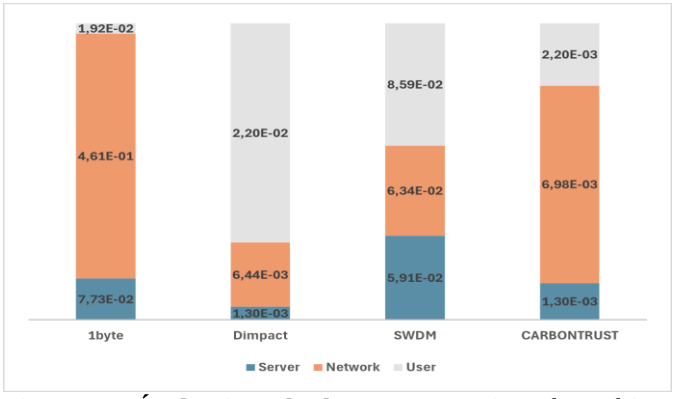


Figure 2. Évaluation de la consommation énergétique (kWh) par couche : serveur, réseau et utilisateur.

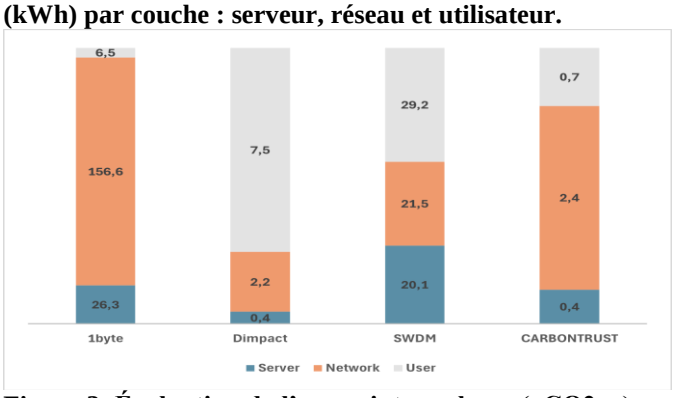


Figure 3. Évaluation de l'empreinte carbone (gCO2eq) par couche : serveur, réseau et utilisateur.

Il est donc pertinent d'explorer d'autres approches, notamment ascendantes, qui visent à estimer l'empreinte carbone en mesurant plus précisément chaque processus composant un service numérique.

Dans cette optique, nous proposons un nouveau modèle de prédiction, **EcoByteIA**, entrainé à partir de consommations énergétiques capturées en temps réel. Ce modèle repose sur une approche ascendante combinée au machine learning pour affiner l'évaluation de la consommation énergétique et de l'empreinte carbone des services numériques. La section suivante détaille la conception et le fonctionnement de notre approche.

3 Nouveau Modele base sur de l'apprentissage supervise

Afin d'améliorer la précision de l'évaluation de l'empreinte carbone des services numériques, nous proposons un nouveau modèle de prédiction, EcoByteIA, basé sur un apprentissage supervisé. Contrairement aux méthodes qui reposent sur des calculs statiques ou des estimations globales, EcoByteIA exploite des mesures capturées en temps réel et des modèles prédictifs afin d'affiner l'estimation de la consommation énergétique et de l'empreinte carbone. Ce modèle repose sur deux phases principales :

1. **Construction du dataset** : Collecte et prétraitement des données nécessaires à l'entraînement du modèle.
2. **Entraînement du modèle** : Apprentissage supervisé à partir du dataset pour établir des relations entre les paramètres d'entrée et l'empreinte carbone observée.

3.1 Phase 1 : Construction d'un dataset

Pour évaluer les performances de notre modèle, nous avons constitué un dataset spécifique, basé sur les pages web les plus consultées au monde, noté T1m (*Top 1 million des sites web*) (Cisco, Umbrella , 2016). La construction de ce dataset s'est déroulée en plusieurs étapes, chacune visant à garantir la qualité et la pertinence des données collectées pour l'entraînement du modèle EcoByteIA.

1. **Filtrage des URLs valides** : Nous avons commencé avec une liste initiale d'un million d'URLs correspondant aux sites web les plus visités. Chaque URL a été testée afin de vérifier sa validité en utilisant un script Python exploitant la bibliothèque requests. Seules les pages accessibles (répondant avec un code HTTP 200) ont été conservées, réduisant ainsi le volume de données initial.

2. **Extraction des caractéristiques des pages** : Les URLs valides ont ensuite été analysées pour extraire des métriques. Cette phase a été réalisée à l'aide de Selenium (Python, 2024) pour le scraping des pages et de Google Chrome, nous permettant de récupérer plusieurs indicateurs clés :

- **Taille du DOM** : Nombre total d'éléments HTML présents dans la page.
- **Volume des données transférées** : Taille compressée et non compressée des ressources chargées.
- **Nombre total de requêtes HTTP** : Nombre de requêtes envoyées aux serveurs, représentant la charge réseau et serveur nécessaire au chargement de la page.

3. **Mesure de la consommation énergétique :** Afin d'évaluer l'impact énergétique du chargement de ces pages, nous avons utilisé un wattmètre logiciel (*PowerAPI*) couplé à deux bases de données :

- MongoDB pour la gestion des données issues des capteurs (HWPC Sensor (powerapi, 2025)).
- InfluxDB pour stocker les mesures de consommation énergétique.

Ces mesures ont été complétées par des estimations théoriques de la consommation du réseau et des serveurs. Ces valeurs ont été déterminées à partir de l'étude d'un site web développé localement, hébergé sur notre propre serveur, et conçu à l'aide du CMS WordPress. Ce choix s'explique par la prédominance de WordPress sur le marché, représentant 62 % des parts de marché dans le développement de sites web (W3Techs, 2025). Chaque page a été chargée dans Google Chrome, et la consommation d'énergie a été enregistrée sur un intervalle de 30 secondes, puis convertie en kilowattheures (kWh).

L'ensemble de ces informations constitue notre dataset final, qui servira de base pour l'évaluation et l'entraînement du modèle EcoByteIA. Voici un exemple d'une ligne de notre dataset :


```
{"url":"https://www.conserto.pro/", "dom_size": 434, "total_compressed": 909000, "total_uncompressed": 1200000, "request_count": 26, "Energie_kwh": 0.0007937761679938067}
```


Ce dataset permet notamment d'analyser l'impact des différentes structures de pages web sur leur consommation d'énergie, offrant ainsi un dataset riche et pertinent pour le développement d'un modèle de prédiction plus précis.

3.2 Phase 2 : Entraînement du modèle

L'entrainement du modèle EcoByteIA repose sur l'apprentissage supervisé, une approche consistant à développer des modèles prédictifs à partir d'un dataset annoté. L'objectif est de permettre au modèle d'estimer la consommation d'énergie et l'empreinte carbone d'une page web en fonction de ses caractéristiques de performance. Dans notre cas, le modèle apprend à établir une relation entre les variables explicatives (X) : les métriques collectées lors de la Phase 1 (Taille du DOM, Volume des données transférées, Nombre total de requêtes http) et la variable cible (y) : Consommation énergétique mesurée en temps réel avec PowerAPI, obtenue lors de l'expérimentation de la Phase 1.

L'objectif est que le modèle apprenne à prédire y en fonction des variables explicatives X qui lui sont fournies.

Une fois les variables définies, nous avons sélectionné plusieurs algorithmes pour comparer leurs performance (Régression Linéaire, arbres de décision, Régression logistique, Support Vector Machine (SVM), Random Forest etc).

Chaque modèle a été évalué en fonction de plusieurs métriques de performance (erreur moyenne MAE, erreur quadratique moyenne MSE, R^2, etc.), afin de sélectionner l'algorithme offrant la meilleure précision.

4 RESULTATS EXPERIMENTAUX

Dans cette section, nous présentons les résultats expérimentaux obtenus à partir du modèle EcoByteIA, ainsi que sa comparaison avec d'autres modèles. Les expérimentations ont été réalisées sur une machine équipée d'un processeur Intel(R) Core(TM) i7-6700K CPU @ 4.00GHz, de 32 Go de mémoire vive, et d'un système d'exploitation Debian 6.1.119-1 (2024-11-22) x86_64 GNU/Linux.

L'implémentation du modèle EcoByteIA a été effectuée à l'aide de la bibliothèque open-source Scikit-Learn sous Python, permettant l'entraînement et l'évaluation des performances du modèle (scikit-learn, 2025).

4.1 Dataset Expérimental

Le dataset, détaillé dans la Phase 1 (section 3.1), est basé sur l'analyse des pages web du Top 1 Million des sites les plus consultés. Cependant, son traitement intégral s'est avéré non exploitable, principalement en raison du temps d'analyse par page. Chaque page nécessite une extraction des métriques et une mesure énergétique, ce qui ralentit considérablement le processus global. De plus, l'insertion de time sleep dans notre script est indispensable pour éviter les interférences entre les ouvertures et fermetures de Chrome (ex. surcharge du navigateur, conflits dans l'exécution parallèle etc). Ces pauses sont également justifiées par d'autres contraintes techniques, garantissant la fiabilité des mesures. Malgré l'utilisation d'une machine performante (Intel i7-6700K, 32 Go RAM), la charge CPU et mémoire induite par l'exécution simultanée de Selenium et PowerAPI a limité le traitement parallèle. De plus, le stockage des données structurées et des logs de consommation énergétique nécessite un espace important, impactant directement le nombre d'URLs analysées simultanément. Par conséquent, en raison de la complexité du processus de collecte et de mesure, nous avons, pour l'instant, traité un sous-échantillon de 4901 URLs. Le processus d'extraction et de mesure est toujours en cours d'exécution, et cette base de données sera enrichie ultérieurement.

4.2 Analyse du Dataset Expérimental

Nous avons commencé par construire un premier dataset constitué de 4901 URLs. Ce dataset sera enrichi ultérieurement avec de nouvelles observations. Nous avons pris en compte les variables suivantes : taille du DOM (dom_size), nombre de requêtes (request_count), taille des données compressées

(total_compressed), taille des données non compressées (total_uncompressed). Ces variables servent d'entrants au modèle pour estimer la consommation énergétique (consumption_kWh) d'une page web. L'analyse descriptive représentée dans la ***Figure 4*** montre que :

- Les écarts min/max sont très importants, expliquant la diversité des sites web analysés.
- La présence de valeurs extrêmes, comme une taille DOM de 56 780 éléments ou une taille non compressée de 1.88e+9, peut s'expliquer par des développements non optimisés ou des pratiques spécifiques (ex. sites publicitaires).
- Les distributions des variables sont fortement asymétriques, indiquant que la majorité des sites ont des valeurs faibles, tandis qu'un nombre réduit présente des valeurs extrêmes.
- En particulier, la taille du DOM et le nombre de requêtes affichent une forte concentration vers de faibles valeurs, mais avec des valeurs extrêmes allant jusqu'à 56 780 éléments pour le DOM et 795 requêtes HTTP.

Concernant la consommation d'énergie, nous avons enregistré la consommation (la variable consumption_kWh) pendant 30 secondes et nous observons que :

- La présence d'outliers énergétiques est notable, avec certaines pages affichant des valeurs bien supérieures à la moyenne.
- La majorité des pages consomment peu d'énergie, mais quelques-unes se démarquent nettement, ce qui pourrait être lié à des ressources lourdes telles que des vidéos, des animations interactives ou des scripts complexes.

	dom_size	total_compressed	total_uncompressed	request_count	consumption_kWh
count	4901	4901	4901	4901	4901
mean	2588.527035	6.989660e+04	2.594067e+06	99.388696	0.000644
std	3915.689310	2.581993e+05	2.792466e+07	80.224690	0.002334
min	3.000000	6.400000e+01	1.000000e+00	1.000000	0.000023
25%	569.000000	1.484900e+04	5.581330e+05	43.000000	0.000270
50%	1384.000000	3.135700e+04	1.153324e+06	81.000000	0.000376
75%	3137.000000	5.542300e+04	2.319161e+06	132.000000	0.000644
max	56780.000000	7.875579e+06	1.885167e+09	795.000000	0.094288

Figure 4. Analyse Descriptive du dataset.

Nous avons regardé aussi la corrélation de Spearman, vu la présence de données aberrantes. La ***Figure* 5** affiche les coefficients de corrélation de Spearman pour toutes les paires de variables. Il est clair que :

- La corrélation entre le nombre de requêtes et la taille des données compressées est très élevée (0.88) et plus important que la corrélation entre le nombre de requêtes et la taille des données non compressées qui est égal à 0.71, ce qui indique que la taille des données compressées est plus sensible que la taille des données non compressées à une augmentation du nombre de requêtes, ce qui est vrai en général.
- Les variables structurelles (dom_size, request_count, total_compressed, etc.) présentent une faible corrélation avec la consommation d'énergie.
- En particulier, la taille des données non compressées affiche une faible corrélation avec la consommation d'énergie, suggérant que la taille brute d'une page n'est pas un facteur direct de sa consommation d'énergie.
- La faible corrélation entre nombre de requêtes et la consommation d'énergie laisse entendre que d'autres facteurs, tels que l'exécution de scripts dynamiques, peuvent jouer un rôle clé.

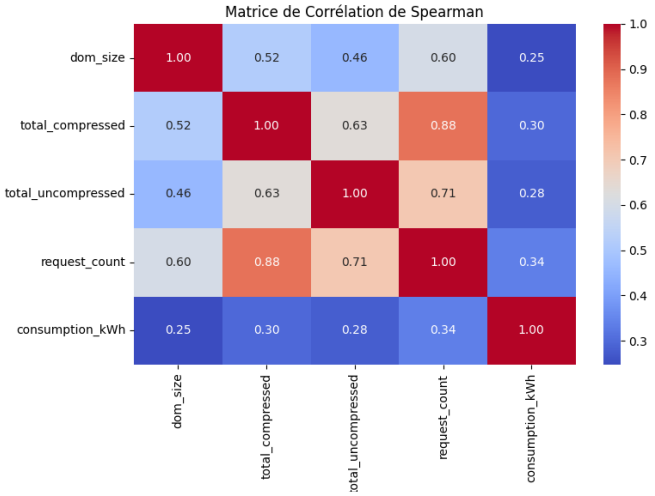


Figure 5. Analyse de la Corrélation de Spearman des paires de variables.

4.3 Construction du modèle de prédiction

Nous avons dans un premier temps privilégié l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage supervisé pour estimer la consommation énergétique des sites web. Ce choix repose sur deux facteurs principaux : la disponibilité d'une base d'URLs volumineuse et diversifiée, et la capacité à mesurer automatiquement la consommation énergétique associée à ces sites. Cette configuration nous permet de disposer d'un jeu de données annoté de manière automatique, facilitant ainsi l'entraînement et l'évaluation des modèles prédictifs.

Nous avons commencé par éliminer les données aberrantes. Ces données sont très éloignées des autres données et cette distance est difficile à expliquer. C'est le cas des 2.5% des valeurs les plus élevées de la taille du DOM, 1.5% des valeurs les plus élevées du nombre de requêtes et des 3% des valeurs les plus élevées de la taille des données non compressées. Le nombre d'urls retenue devient 4407. Étant donné l'hétérogénéité des variables, il est nécessaire d'opter pour des modèles non linéaires, dont nous présenterons les résultats dans la section suivante.

4.4 Implémentation et comparaison des modèles

L'implémentation du modèle EcoByteIA a été réalisée avec Scikit-Learn en Python, dans le but d'évaluer les performances de divers algorithmes de machine learning pour prédire la consommation énergétique des pages web. Le prétraitement des données est effectué à l'aide de la transformation logarithmique (log1p()), qui réduit l'impact des valeurs extrêmes des variables X, et de la standardisation (StandardScaler), qui met les variables à l'échelle pour éviter les déséquilibres entre les différentes unités de mesure. Ces techniques sont choisies pour améliorer la stabilité et la performance des modèles en normalisant la distribution des données.

Nous avons retenu deux modèles non linéaires, Random Forest et Gradient Boosting, qui sont robustes aux variations. Le ***Tableau 3*** illustre nos premiers résultats obtenus.

Tableau 3. Performance des modèles

Modèles	R^2	MAE	MSE
RandomForest	0.338810	0.000006	1.16e-09
GradientBoosting	0.397072	0.000006	1.06e-09

Les résultats obtenus montrent que Gradient Boosting offre de meilleures performances que Random Forest, avec un léger gain en précision (R^2 = 0.397072 contre 0.338810). Toutefois, les valeurs de R^2 restent relativement faibles, indiquant que les variables explicatives utilisées ne capturent pas encore suffisamment bien la complexité de la consommation énergétique des pages web. Ces résultats suggèrent la nécessité d'affiner le modèle en explorant de nouvelles variables explicatives et en augmentant la taille du dataset afin d'améliorer la capacité de généralisation de l'algorithme.

Une analyse qualitative des erreurs du modèle Gradient Boosting montre que les plus fortes erreurs absolues concernent principalement les pages web à forte consommation énergétique ou à structure atypique. Celles-ci se caractérisent souvent par un grand nombre de requêtes, un volume élevé de données transférées, ou l'intégration de contenus dynamiques comme des vidéos ou des scripts tiers. Cette tendance est confirmée par une forte corrélation entre l'erreur absolue et les variables max_kwh (ρ = 0.96) et moyenne_kwh (ρ = 0.94), indiquant que le modèle a du mal à généraliser dans les cas extrêmes. À l'inverse, des variables comme dom_size ou total_compressed semblent avoir un impact plus marginal. La ***Figure 6***, qui visualise les erreurs absolues en fonction de la consommation réelle, met en évidence que les plus faibles et les plus fortes consommations énergétiques sont associées aux écarts de prédiction les plus importants.

La ***Figure 7*** représente les moyennes des écarts entre les valeurs prédites par différents modèles et les vraies valeurs. Les modèles Random Forest et Gradient Boosting affichent des écarts moyens très faibles (≈ 2.88E-01 et 3.37E-01 respectivement), suggérant qu'ils fournissent des estimations très précises et bien alignées avec les mesures réelles. En revanche, les modèles 1byte et Dimpact présentent des écarts moyens plus élevés (3.59E+03 et 4.15E+03 respectivement), ce qui indique que leurs estimations s'éloignent fortement des valeurs observées. Ces écarts traduisent une surestimation de la consommation énergétique des pages web analysées.

Le modèle CARBONTRUST, bien que présentant un écart plus faible que 1byte et Dimpact (6.25E+02), demeure moins précis que les modèles basés sur l'apprentissage supervisé. Le modèle SWDM, avec un écart moyen de 6.44E+01, se situe entre CARBONTRUST et les modèles de machine learning en termes de précision, mais reste moins performant que Random Forest et Gradient Boosting.

Ces résultats démontrent que l'approche machine learning adoptée par EcoByteIA améliore la précision de l'estimation énergétique par rapport aux méthodes traditionnelles basées sur des formules statiques et des moyennes globales. Ainsi, le machine learning, en exploitant des données mesurées en temps réel, constitue une alternative robuste et efficace pour affiner l'évaluation de l'empreinte carbone des services numériques.

Au-delà de l'aspect académique, EcoByteIA est né d'un projet de R&D répondant à des besoins concrets en matière de mesure environnementale du web. Il est en cours d'intégration dans GreenTrackr, une extension de navigateur disponible sur Chrome (v2.2.3), qui propose déjà un modèle dynamique EcoByte pour estimer l'empreinte carbone des pages web. Une version publique est accessible sur le Chrome Web Store (Conserto (Extension), 2024), et le code source est disponible en open source sur GitHub (Conserto (Github), 2024). Plusieurs évolutions sont en cours, notamment l'extension de la compatibilité à d'autres navigateurs (Firefox, Safari, Edge), le développement d'une version en ligne de commande (CLI) dockerisée pour une intégration dans les pipelines CI/CD, ainsi qu'un plugin dédié aux environnements de développement (IDE) comme VSCode ou IntelliJ. Ce type d'intégration facilite la prise de décision en temps réel pour les développeurs, en leur fournissant des indicateurs clairs et actionnables dès les phases de développement ou de déploiement, ce qui favorise une démarche d'écoconception dans les projets numériques.

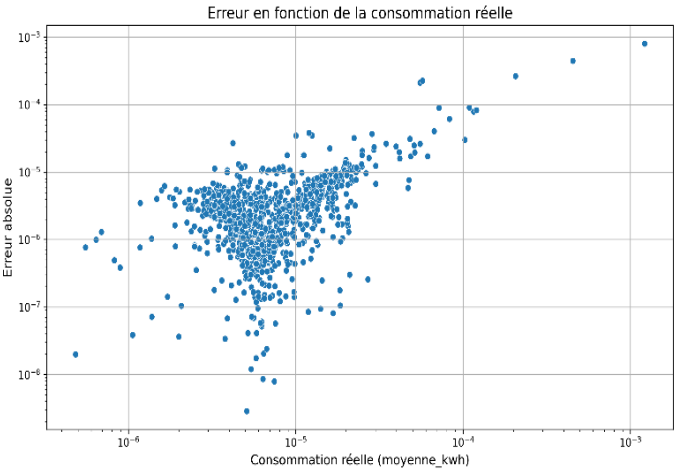


Figure 6. Erreur absolue du modèle en fonction de la consommation réelle.

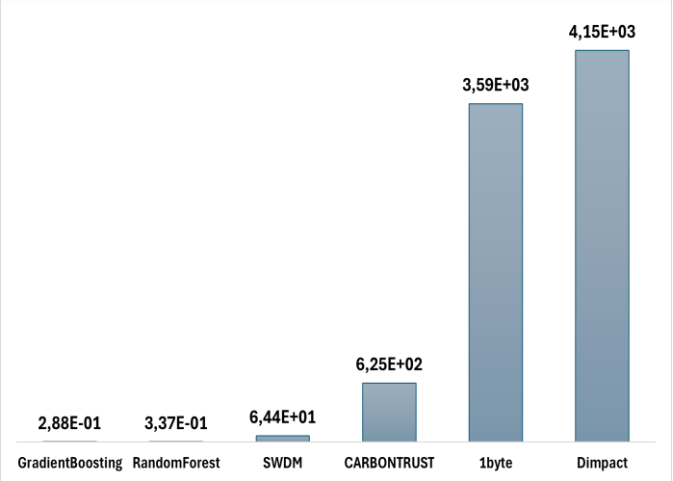


Figure 7. Moyenne des écarts entre les valeurs prédites par chaque modèle et les vraies valeurs.

5 CONCLUSIONS

L'empreinte carbone des services numériques constitue un enjeu majeur dans le contexte actuel de transition écologique. Face aux limites des méthodes existantes, qui reposent principalement sur des approches descendantes et des estimations globales, nous avons proposé un nouveau modèle, **EcoByteIA**, basé sur l'apprentissage supervisé.

Notre étude a permis de démontrer que les modèles classiques présentent des écarts significatifs dans leurs estimations de la consommation énergétique et de l'empreinte carbone des services numériques dans certains cas pratiques, en particulier pour l'évaluation des sites web. Ces écarts soulignent le besoin de modèles plus précis et mieux adaptés aux spécificités des

architectures web modernes. EcoByteIA adopte une approche ascendante en exploitant des mesures capturées en temps réel, ce qui lui permet d'affiner considérablement l'évaluation de l'empreinte carbone.

Toutefois, les résultats obtenus montrent que les performances des modèles de machine learning testés restent encore limitées. Les algorithmes Random Forest et Gradient Boosting affichent des coefficients de détermination R^2 respectivement de 0.338 et 0.397, indiquant une capacité encore insuffisante à prédire avec précision la consommation énergétique des sites web et l'empreinte carbone. Malgré ces limites, ces premiers résultats offrent une base encourageante pour l'amélioration du modèle en intégrant de nouvelles optimisations.

Plusieurs axes d'amélioration peuvent être envisagé pour renforcer la robustesse et la précision d'EcoByteIA, augmentation du volume de données collectées, ainsi que répartir les sites web par catégories (médias, e-commerce, réseaux sociaux, etc) afin d'améliorer la robustesse du modèle. Tester d'autres techniques telles que le clustering, les réseaux de neurones, pourraient permettre une meilleure caractérisation des profils énergétiques des pages web.

Actuellement, la consommation énergétique est mesurée sur un intervalle de 30 secondes, ce qui peut être insuffisant pour capturer la variabilité réelle de l'usage. Une évaluation plus complète devrait inclure de véritables parcours utilisateurs, intégrant la navigation sur plusieurs pages, les interactions dynamiques (scroll, clics, formulaires etc.), ainsi que les variations de charge sur les serveurs en fonction du trafic.

Notre modèle EcoByteIA ne prend actuellement en compte que la consommation énergétique liée à l'utilisation des services numériques, sans intégrer l'énergie grise générée par la production des équipements (serveurs, infrastructures réseau, terminaux utilisateurs). Or, la fabrication de ces équipements représente une part significative de l'impact environnemental du numérique. L'intégration de cette dimension permettrait une évaluation plus globale et plus proche de la réalité, en tenant compte du cycle de vie complet des infrastructures numériques.

L'empreinte carbone d'un service numérique dépend fortement du mix énergétique utilisé par les serveurs d'hébergement et les utilisateurs finaux. Intégrer ces paramètres dans les calculs, ainsi que la distance parcourue par les données sur le réseau, permettrait d'affiner encore davantage les estimations et d'offrir une vision plus représentative de la consommation énergétique réelle.

Pour aller au-delà de l'empreinte carbone, il serait pertinent d'intégrer d'autres indicateurs environnementaux, telles que la quantité d'eau consommée et l'utilisation des ressources abiotiques (extraction de minerais et métaux rares nécessaires à la fabrication des équipements). Une telle approche multicritère permettrait d'avoir une évaluation plus complète de l'impact des services numériques sur l'environnement.

6 REFERENCES

Adem. (2025, 01). *Les impacts bien réels du numérique.* Récupéré sur librairie.ademe: https://librairie.ademe.fr/economie-circulaire-et-dechets/7828-ademe-magazine-n-175-janvier-2025.html

Ademe. (2023, Janvier). *Référentiel par Catégorie de Produit (RCP) des services numériques.* Récupéré sur librairie.ademe.fr: https://librairie.ademe.fr/produire-autrement/6022-referentiel-par-categorie-de-produit-rcp-des-services-numeriques.html

Bordage F. (2019). *greenit.fr.* Récupéré sur The environmental footprint of the digital world. GreenIT: France.

Bordage, F. (2019). Empreinte environnementale du numérique mondial. *Paris, greenit. fr*, 9.

Conserto. (2024, 12 08). *GreenTrackr_Extension*. Récupéré sur Chrome Web Store: https://chromewebstore.google.com/detail/greentrackr/felcpalgepcmkphplglfpmgbidfmanea

Conserto. (2024, 12 06). *GreenTrackr_github*. Récupéré sur Github: https://github.com/Conserto/GreenTrackR

ElectricityMaps. (2025). *Electricity Maps*. Récupéré sur electricitymaps: https://www.electricitymaps.com

européenne, C. (2013-2018). *EnvironmentalFootprint*. Récupéré sur eplca.jrc.ec.europa.eu: https://eplca.jrc.ec.europa.eu/EnvironmentalFootprint.html

Ferreboeuf, H. E.-H. (2018). *ICT–Pour une sobriété numérique: rapport du groupe de travail dirigé par Hugues Ferreboeuf pour le think tank The Shift Project.* The Shift Project.

GreenIT.fr. (2019). Récupéré sur Greenit.fr: https://www.greenit.fr/etude-empreinte-environnementale-du-numerique-mondial/?utm_source=chatgpt.com#volution-de-2010--2025

IEA. (2023, July 11). *Data Centres and Data Transmission Networks*. Récupéré sur iea: https://www.iea.org/energy-system/buildings/data-centres-and-data-transmission-networks#tracking

intel. (2024, 11 12). *Running Average Power Limit Energy Reporting*. Récupéré sur intel: https://www.intel.com/content/www/us/en/developer/articles/technical/software-security-guidance/advisory-guidance/running-average-power-limit-energy-reporting.html?utm_source=chatgpt.com

Johnston, A. a. (2022). Using DIMPACT to calculate the carbon impact of digital publishing at Cambridge University Press & Assessment. *Learned Publishing*, 1.

Kamiya, G. (2020, 12 11). *The carbon footprint of streaming video: fact-checking the headlines*. Récupéré sur iea: https://www.iea.org/commentaries/the-carbon-footprint-of-streaming-video-fact-checking-the-headlines

Malmodin, J. &. (2018). The energy and carbon footprint of the global ICT and E\&M sectors 2010--2015. *Sustainability*, 3027.

Malmodin, J. L. (2024). ICT sector electricity consumption and greenhouse gas emissions--2020 outcome. *Telecommunications Policy*, 102701.

Masanet, E. S. (2020). Recalibrating global data center energy-use estimates. *American Association for the Advancement of Science*, 984-986.

Moulierac, J. a.-K. (2023). *What is the carbon footprint of one hour of video streaming?* Doctoral dissertation, Université Côte d'Azur.

Obringer, R. a.-S. (2021). The overlooked environmental footprint of increasing Internet use. *Resources, Conservation and Recycling*, 04.

powerapi. (2025). *powerapi*. Récupéré sur powerapi: https://powerapi.org/

Ristic, B. a. (2019). The relative aggregate footprint of electricity generation technologies in the European Union (EU): A system of systems approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 282--290.

scikit-learn. (2025). *scikit-learn*. Récupéré sur scikit-learn: https://scikit-learn.org/stable/

SG Andrae, A. (2020). New perspectives on internet electricity use in 2030. *Engineering and Applied Science Letter*, 19--31.

Siteefy. (2025). */how-many-websites-are-ther*. Récupéré sur Siteefy: https://siteefy.com/how-many-websites-are-there/

Stephens, A. T.-W. (2021). *Carbon impact of video streaming.* Carbon Trust.

Sustainable Web Design Model. (2025). *Estimating Digital Emissions*. Récupéré sur sustainablewebdesign: https://sustainablewebdesign.org/estimating-digital-emissions/

Umbrella, C. (2016). *Cisco Umbrella*. Récupéré sur mbrella-static.s3-us-west-1.amazonaws: https://umbrella-static.s3-us-west-1.amazonaws.com/index.html

W3Techs. (2025). *World Wide Web Technology Surveys*. Récupéré sur W3Techs: https://w3techs.com/

Zahout, B. &. (2022). *Computing Digital Footprints: A New Model and Empirical Study.* Asia Conference on Environment and Sustainable Development: Springer.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Intégration verticale ERP/MES : OntoIMR pour les gammes de fabrication

CLAIRE JODEAU[1], CHRISTOPHE DANJOU[1],

[1] AFFILIATION
2500 chemin de Polytechnique, Canada
claire.jodeau@polymtl.ca

***Résumé* – L'intégration verticale des systèmes de planification des ressources de l'entreprise (ERP) et des systèmes d'exécution manufacturière (MES) représente un enjeu crucial pour améliorer l'efficacité des entreprises manufacturières. Pourtant, ces systèmes fonctionnent encore trop souvent de manière isolée, entrainant des saisies redondantes, des erreurs et, plus largement, une interopérabilité insuffisante. Pour contrer ce manque de standardisation dans le fonctionnement des échanges de données, cet article propose une approche basée sur un modèle ontologique permettant de structurer les gammes de fabrication de manière unifiée entre ERP et MES pour favoriser leur intégration. En s'appuyant sur une analyse comparative de plusieurs logiciels ERP et MES et sur la norme ISA-95, cet article propose le modèle OntoIMR visant à standardiser la représentation des gammes de fabrications. La représentation OWL (Web Ontology Language) est retenue afin d'assurer l'intégrité et l'extensibilité du modèle. La méthodologie adoptée pour sa construction, ses principaux composants et les bénéfices qu'il pourrait apporter dans un contexte manufacturier sont alors détaillés. En réduisant la duplication des données et en améliorant la traçabilité, notre approche vise à optimiser la gestion des processus de fabrication. Une validation sur des cas réels est envisagée afin d'évaluer la pertinence du modèle dans différentes configurations industrielles.**

Abstract - The integration of Enterprise Resource Planning (ERP) and Manufacturing Execution Systems (MES) represents a crucial challenge for improving the efficiency of industrial companies. Yet all too often, these systems still operate in isolation, resulting in redundant data entry, errors and, more generally, insufficient interoperability. To counter this lack of standardization in the way data is exchanged, this article proposes an approach based on an ontological model that enables manufacturing routings to be structured in a unified way between ERP and MES, thus promoting vertical integration. Based on a comparative analysis of several ERP and MES software packages, as well as on the ISA-95 standard, this article proposes the model OntoIMR aimed at standardizing the representation of routings, by integrating operations, sequences and associated resources. The OWL (Web Ontology Language) representation is chosen to ensure the model's consistency and extensibility. The methodology adopted for its construction, its main components and the benefits it could bring in a manufacturing context are then detailed. By reducing data duplication and improving traceability, our approach aims to optimize the management of manufacturing processes. A validation on real cases is envisaged to evaluate the relevance of the model in different industrial configurations.

***Mots clés* - Interopérabilité, MES, ERP, Ontologie, Gamme de fabrication**
***Keywords* – Interoperability, MES, ERP, Ontology, Routing**

1 INTRODUCTION

Les logiciels de gestion d'entreprise tels que les systèmes de planification des ressources (ERP, Enterprise Resource Planning) et les systèmes d'exécution manufacturière (MES, Manufacturing Exécution System) jouent un rôle toujours plus important au sein des organisations manufacturières. En effet, ces deux applications permettent d'approcher l'excellence organisationnelle, le premier en fournissant une vue d'ensemble de la planification et de la gestion des ressources, le second permettant le suivi de l'exécution des opérations en temps réel. Leur interopérabilité constitue alors un levier stratégique pour améliorer leur réactivité face au changement de la demande et aux perturbations de la chaînes logistique et l'intégration fluide des processus métier et de production Cependant, l'intégration des informations de ces deux systèmes est souvent incomplète ou très chronophage, ce qui peut engendrer des redondances d'entrée d'informations, des incohérences et une perte d'efficacité dans la gestion globale des données manufacturières(Shevchenko et al., 2022).

Malgré les avancées technologiques et l'essor des approches d'interopérabilité, les systèmes ERP et MES restent souvent découplés, obligeant les entreprises à répliquer manuellement les informations critiques entre ces deux systèmes. Ce manque de lien direct provoque non seulement des retards dans l'exécution des opérations, mais également une augmentation du risque d'erreurs humaines et une perte de transparence dans la gestion des flux de production. En particulier, l'établissement des gammes de fabrication (étapes et séquences de production) et leur transfert harmonieux entre les ERP et les MES est un défi majeur. Cette situation est d'autant plus critique dans un contexte d'industrie 4.0, où les systèmes sont amenés à échanger des données de manière fluide et standardisée (Panetto & Molina, 2008).

C'est pourquoi, dans cet article une solution de couplage entre MES et ERP pour assurer l'interopérabilité des systèmes au niveau des gammes de fabrication est proposée. C'est à dire un modèle de gamme de fabrication basé sur une ontologie qui se veut le plus standard et généralisable possible afin d'alimenter

à la fois l'ERP et le MES des entreprises aussi bien lors de la définition d'une nouvelle gamme mais également lors de ses mises à jour.

Pour répondre à cette problématique, une revue de la littérature permettra, dans un premier temps, de déterminer les technologies pouvant être utilisées pour le couplage et de mettre en lumière le modèle de données le plus adapté à notre besoin. Ensuite, notre méthodologie pour l'élaboration du modèle commun de gamme de fabrication entre l'ERP et le MES sera présentée. Puis, la section 4, permettra d'exposer le choix et le développement de l'outil ontologique OntoIMR retenu avant de conclure sur les résultats et les perspectives de cette recherche.

2 REVUE DE LITTÉRATURE

La norme ISA-95, développée par l'International Society of Automation, constitue une référence essentielle pour l'intégration verticale entre MES, ERP et les opérations sur le plancher manufacturier. Elle fournit un cadre structuré permettant de rationaliser les processus et d'améliorer les normes industrielles. Cependant, malgré ces avancées, il n'existe pas encore de plateforme universelle de couplage qui facilite pleinement l'intégration entre MES et ERP, laissant place à des développements technologiques et des solutions personnalisées pour combler cette lacune. (Oman et al., 2017). Les coûts d'adoption de cette technologie et de son couplage avec un éventuel ERP sont alors particulièrement élevés, ralentissant fortement leurs adoptions notamment pour les PME, ce qui nuit fortement à leur compétitivité. (Shojaeinasab et al., 2022).

Différentes technologies ont été explorées pour faciliter le couplage entre les systèmes MES et ERP. Parmi les solutions les plus répandues, on retrouve :

- Les middlewares basés sur les architectures orientées services (SOA), qui offrent une grande flexibilité et permettent de standardiser les échanges de données via des protocoles comme SOAP ou REST, assurant ainsi une intégration indépendante des fournisseurs.
- Les Enterprise Service Buses (ESB) qui assurent la médiation et la transformation des données, garantissant la compatibilité des formats et des protocoles entre MES et ERP. Elles permettent également une scalabilité accrue et une gestion simplifiée des flux de données.
- Le Cloud Computing, qui est en pleine émergence, notamment pour les PME, il réduit les coûts d'infrastructure et offre une adaptabilité rapide aux évolutions du marché (Morariu & Borangiu, 2012).

Cependant, ces méthodes restent entravées par des contraintes de coûts, de complexité et de temps. En effet, elles doivent être adapter à chaque entreprise, elles nécessitent donc d'outil de standardisation pour maximiser leur potentiel et leur déploiement.

Pour construire une plateforme de couplage des logiciels ERP et MES centrée sur les gammes de fabrication, il est nécessaire de construire un modèle de gamme commun incluant les informations des deux systèmes. De nombreux modèles sont décrits dans la littérature, parmi lesquels les modèles hiérarchiques, en réseau, relationnels, orientés objet, NoSQL et ontologiques. Ces modèles se distinguent par leurs caractéristiques, et leur pertinence dépend de critères spécifiques au contexte d'utilisation.

Dans le cadre de notre étude, plusieurs critères sont essentiels pour évaluer leur adéquation à un modèle commun de gamme de fabrication destiné à deux logiciels. Ces critères incluent notamment la scalabilité, la capacité à gérer un grand volume de données, la performance face aux requêtes complexes, la complexité d'utilisation, l'intégrité des données, la gestion de types de données complexes, la flexibilité de développement, l'extensibilité, l'expressivité sémantique et l'interopérabilité. Trois critères se révèlent particulièrement décisifs pour un couplage ERP-MES : l'intégrité des données, qui assure la cohérence et la synchronisation des données entre les deux systèmes, l'extensibilité, qui permet au modèle de s'adapter à l'évolution des besoins industriels et des technologies sans compromettre les données existantes et l'interopérabilité, qui permet une intégration fluide de notre solution aux systèmes ERP et MES.

Afin d'évaluer les modèles, une notation basée sur une revue d'articles scientifiques leur a été attribuée pour chaque critère, selon une échelle allant de "—" (très faible) à "++" (très élevée). Le Tableau 1 ci-dessous synthétise les résultats obtenus :

Tableau 1 : Évaluation des différentes bases de données

Critère	Hiérarchique	En réseau	Relationnel	Orienté objet	NoSQL	Ontologie
Scalabilité	+	+	+ (Phiri & Kunda, 2017)	+ (Ijmter, 2014)	++ (Phiri & Kunda, 2017), (Cattell, 2011)	+ (Staab & Studer, 2009)
Volume de données	+ (Blatt, 1987)	++ (Blatt, 1987)	+ (Phiri & Kunda, 2017)	++ (Ijmter, 2014)	++ (Phiri & Kunda, 2017), (Cattell, 2011)	+ (Staab & Studer, 2009)
Performance de requêtes	- (Suri & Sharma, 2011) (Blatt, 1987)	++ (Blatt, 1987)	+ (Phiri & Kunda, 2017)	++ (Ijmter, 2014)	++ (Phiri & Kunda, 2017), (Cattell, 2011)	++ (Sir et al., 2015)
Complexité	++ (Blatt, 1987)	- (Blatt, 1987)	- (Phiri & Kunda, 2017) (Suri & Sharma, 2011)	-- (Ijmter, 2014; Suri & Sharma, 2011)	- (Phiri & Kunda, 2017), (Cattell, 2011)	-- (Staab & Studer, 2009), (Gruber, 1993)
Intégrité de données	+ (Blatt, 1987)	+ (Blatt, 1987)	++	+ (Ijmter, 2014)	-- (Phiri & Kunda, 2017), (Cattell, 2011)	++ (Sir et al., 2015), (Gruber, 1993)
Sécurité	+	+	+ (Phiri & Kunda, 2017)	+ (Suri & Sharma, 2011)	- (Phiri & Kunda, 2017)	+ (Sir et al., 2015)
Type de données complexes	+ (Blatt, 1987)	+ (Blatt, 1987)	+ (Suri & Sharma, 2011)	++ (Ijmter, 2014) (Suri & Sharma, 2011)	++ (Cattell, 2011)	++ (Staab & Studer, 2009)
Maturité du marché / Maintenance	++ (Blatt, 1987)	+ (Blatt, 1987)	++	+ (Ijmter, 2014)	+ (Cattell, 2011)	+ (Staab & Studer, 2009)
Extensibilité	- (Blatt, 1987)	+ (Blatt, 1987)	+ (Suri & Sharma, 2011)	+ (Ijmter, 2014), (Suri & Sharma, 2011)	++ (Cattell, 2011)	++ (Sir et al., 2015), (Staab & Studer, 2009), (Gruber, 1993)
Flexibilité de développement	-- (Blatt, 1987)	+ (Blatt, 1987)	+ (Suri & Sharma, 2011)	++ (Ijmter, 2014), (Suri & Sharma, 2011)	++	++ (Sir et al., 2015)
Interopérabilité	-- (Blatt, 1987)	+ (Blatt, 1987)	+	+ (Ijmter, 2014), (Suri & Sharma, 2011)	+ (Cattell, 2011)	++ (Sir et al., 2015), (Gruber, 1993)
Expressivité	-- (Blatt, 1987)	+ (Blatt, 1987)	+ (Suri & Sharma, 2011)	++ (Ijmter, 2014), (Suri & Sharma, 2011)	+ (Cattell, 2011)	++ (Staab & Studer, 2009), (Gruber, 1993)
Total	1	12	12	15	11	16

À la suite de cette évaluation multicritère, deux modèles de base de données se détachent, le modèle ontologique avec 17 (dix-sept) points et le modèle orienté-objet avec 16 (seize) points. Ces deux modèles ayant des notes relativement proches, évaluons-les sur les critères les plus décisifs pour notre étude : l'extensibilité, l'intégrité des données et l'interopérabilité. D'après l'analyse multicritère, le modèle de données ontologiques est supérieur au modèle orienté objet de 1 point sur chacun des trois critères. Ce modèle ontologique est donc choisi pour construire notre modèle commun de base de données, ce modèle ayant obtenu la meilleure note globale et se distinguant sur les trois critères clés de notre étude. De plus, le modèle ontologique est déjà utilisé pour décrire des données manufacturières, même si son usage reste pour l'instant très académique (Ramis Ferrer et al., 2021).

3 CONSTRUCTION DU MODÈLE COMMUN DE GAMME

Afin de concevoir un modèle de gamme de fabrication à la fois standardisé et extensible, une méthodologie en trois étapes a été adoptée. Dans un premier temps, un modèle commun aux ERP a été élaboré en analysant les structures de données de quatre ERP distincts. Ensuite, un modèle spécifique aux MES a été construit en s'appuyant sur la norme ISA-95 et l'étude de deux systèmes MES. Enfin, ces deux modèles ont été consolidés afin d'aboutir à une structure commune, intégrant les éléments essentiels au bon fonctionnement des deux types de logiciels.

3.1 Modèle commun ERP

Pour construire le modèle commun aux ERP, quatre solutions de tailles et d'architectures variées ont été étudiées : SAP, Business Central, Divalto et JobBoss. L'analyse des deux premiers s'est appuyée sur leur documentation accessible en ligne ainsi que sur des échanges avec des utilisateurs expérimentés. En revanche, les informations sur Divalto et JobBoss, dont la documentation n'est pas librement accessible, ont été obtenues grâce à des discussions avec une entreprise spécialisée dans leur intégration, accompagnées de captures d'écran des champs de données couramment utilisés. Cette double approche a conduit à une granularité inégale des données collectées, plus détaillée pour SAP et Business Central que pour Divalto et JobBoss.

Afin d'élaborer un modèle générique compatible avec ces quatre ERP, et potentiellement extensible à d'autres, plusieurs étapes ont été suivies :

1. Élimination des champs spécifiques au fonctionnement d'un ERP : Les données propres au fonctionnement interne des ERP, sans valeur ajoutée pour la description, l'exécution, ou l'interopérabilité de la gamme, ont été exclues. Par exemple, le champ LongTextLanguageCode de SAP, qui définit la langue d'une gamme, a été jugé non pertinent.
2. Correspondance des champs similaires : Les champs utilisés par plusieurs ERP ont été harmonisés, qu'il s'agisse d'une correspondance exacte ou de variations dans la structure des données (par exemple, un identifiant unique pouvant être un numéro ou une chaîne alphanumérique).
3. Évaluation des champs spécifiques : Pour les champs présents dans un nombre restreint d'ERP, une analyse a permis de déterminer leur utilité. Certains ont été conservés lorsqu'ils contribuaient à la description de la gamme, tandis que d'autres, jugés redondants ou hors du périmètre de notre étude, ont été écartés. C'est notamment le cas des nombreux champs SAP dédiés à la vérification des caractéristiques d'inspection : seuls ceux définissant la caractéristique d'inspection ont été retenus, tandis que les méthodes d'inspection ont été considérées comme une extension possible du modèle, non étudié ici.

Il est alors apparu que SAP et Business proposent un modèle de gamme plus exhaustif que JobBoss et Divalto, dont le modèle est plus compact.
Finalement, le modèle est structuré en plusieurs entités :

- Entête de gamme de fabrication
- Séquence
- Opération
- Affectation du Produit
- Affectation des composants d'opération
- Affectation diverse PRT
- Affectation de document PRT (document technique, plans, manuels techniques)
- Affectation PRT matérielle (matériau utilisé temporairement, ou consommable)
- Affectation des équipement PRT (équipement ou machine)
- Caractéristique d'inspection.

L'ensemble de ces entités regroupe 134 champs différents, offrant ainsi une structure suffisamment détaillée pour couvrir les exigences de description des gammes de fabrication dans différents ERP, tout en restant adaptable à divers besoins. Le nombre de champs utilisé pour les différents ERP sont visible à la Figure 1.

3.2 Modèle commun MES

Pour construire ce modèle, la norme ISA-95 ainsi que deux logiciels MES, Sepasoft et SmartPortal, ont servi de référence.
Comme pour les ERP, une méthode en trois étapes a été suivie : Élimination des champs spécifiques au fonctionnement d'un MES – Correspondance des champs similaires – Évaluation des champs spécifiques.
Toutefois, notre méthodologie a été adaptée en fonction des sources de données disponibles.
La norme ISA-95 propose une structuration détaillée des données MES avec un modèle dédié à la définition du produit (*Product Definition Model*) et ses entités associées. Ce modèle a été utilisé comme référence principale. Pour Sepasoft, l'exploitation de la documentation en ligne et l'analyse de l'implémentation des concepts d'ISA-95 dans le logiciel ont permis d'observer son alignement avec cette norme, bien que certains champs y figurent sans être encore pleinement exploités. Pour SmartPortal, les échanges avec l'entreprise conceptrice ainsi que l'analyse des données réellement utilisées ont servi de base. Contrairement à Sepasoft, SmartPortal adopte une approche minimaliste, privilégiant une flexibilité maximale pour s'adapter aux besoins spécifiques des entreprises et des ERP associés. Cette philosophie implique cependant un accompagnement plus étroit lors de l'intégration du logiciel.

À l'issue de cette analyse, un modèle structuré autour des entités suivantes a été défini :

- Règle de Production du Produit
- Nomenclature de fabrication
- Segment de produit
- Paramètre du produit
- Dépendance du segment produit

- Paramètre du segment de processus
- Dépendance du Segment de Processus
- Spécification du Segment Personnel
- Propriété de la spécification du Segment Personnel
- Classe de personnel
- Propriétés de la classe de personnel
- Personne
- Propriété de la personne
- Spécification du teste de compétence
- Attribut des résultats du test de compétence
- Spécification du segment d'équipement
- Propriétés de la spécification du segment d'équipement
- Classe d'équipement
- Propriété de l'équipement
- Spécification du test de capacité de l'équipement
- Résultat du test de capacité de l'équipement
- Paramètre de production
- Spécification du segment matériel
- Propriété de la spécification du segment matériel
- Classe de matériel
- Propriété de la classe de matériel
- Définition du matériel
- Propriété de la définition du matériel
- Spécification du test QA
- Résultat de test qualité
- Lot de matériel
- Propriété du lot de matériel
- Sous lot de matériel

L'ensemble des champs différents de données du modèle représente 91 visible à la Figure 1.

3.3 Modèle commun ERP-MES

Les deux modèles de gamme de fabrication définis précédemment sont repris dans cette section. Leur mise en commun a été réalisée en regroupant les données communes et en ajoutant celles présentes uniquement dans l'un des deux modèles, mais nécessaires, par construction, à une définition complète de la gamme. Un point a cependant nécessité notre attention : la méthode de définition d'une séquence d'opération. En effet sur le modèle de gamme de l'ERP, la séquence est une entité bien définie qui permet de donner un ordre à chaque opération. Alors que de côté du MES, la séquence des opérations est définie à l'aide des dépendances de chaque opération et entre chaque opération. Cette différence ne concerne donc pas quelle donnée est nécessaire mis bien comment est définit l'ordre des opérations conceptuellement. Il est alors choisi de conserver une entité séquence qui portera les informations sur l'ordre des opérations d'une gamme de fabrication. Mais également de conserver une entité qui, pour chaque opération, référence ces dépendances potentielles avec d'autres opérations, ce qui peut être utile en fonction du logiciel pour définir la séquence.

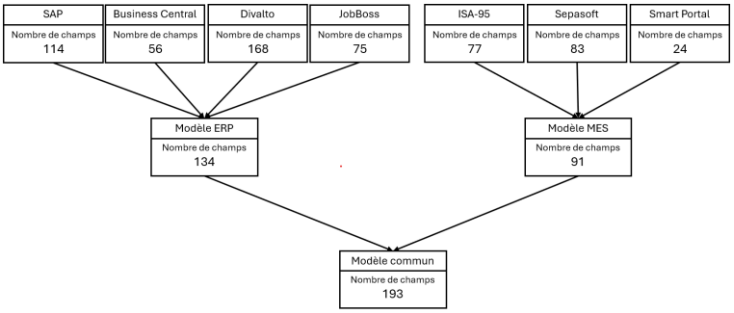


Figure 1: : Schéma récapitulatif de la mise en commun des modèles de gamme de fabrication.

4 CONSTRUCTION DU MODÈLE ONTOLOGIQUE ONTOIMR

4.1 Choix de l'outil pour l'ontologie

L'objectif principal de l'ontologie à construire est de représenter le modèle de gamme de fabrication défini à la section 3. Pour cela, le format OWL DL (Web Ontology Language), standardisé par le W3C, a été retenu. Ce format permet de définir des propriétés de classe complexes ainsi que des relations entre les concepts tout en garantissant la cohérence du modèle grâce à des outils de raisonnement automatique.

Une fois le format OWL DL sélectionné, la plateforme qui servira d'outil de modélisation doit être choisie. Notre choix s'est porté sur Protégé développé par Stanford. Il permet notamment de générer la structure ontologique automatiquement, permet un export sous plusieurs formats XML, RDFS et OWL et offre des plug-in Java pour les requêtes par exemple. En plus d'être gratuit et open-source, il offre une interface graphique orienté utilisateur et est couramment adopté dans des projets industriel et académique (Musen, 2015), ce qui confirme sa pertinence.

4.2 Construction de l'ontologie

Diverses méthodologies de développement d'ontologies sont recensées dans la littérature. Pour concevoir notre ontologie dédiée à la représentation des gammes de fabrication, une approche de modélisation UML, tel que décrit dans l'article (Saha et al., 2023) est adoptée. Cette approche permet de structurer les opérations et séquences manufacturières à travers les étapes suivantes :

1- Identification des concepts fondamentaux et développer un modèle hiérarchique par une approche top-down. Ces concepts sont ensuite formalisés en tant que *Classes* sur Protégé.
2- Définition des attributs des classes en établissant les relations entre les concepts, lesquelles sont représentées sous forme de *Object Properties* dans Protégé
3- Spécification des cardinalités des relations afin de contraindre et d'affiner les liens entre les entités du modèle.

Cette même méthodologie est appliquée pour structurer intégralement notre ontologie OntoIMR.

4.2.1 Définition des concepts clés

Avant d'aborder la structure complète de l'ontologie, les principales classes qui la composent sont présentées dans le Tableau 2 suivant :

Tableau 2: Principales classes structurantes de l'ontologie avec leur définition

Gamme de fabrication Ensemble structuré d'opérations nécessaires pour transformer une matière première ou un composant en un produit fini ou semi-fini. Elle regroupe les étapes, les ressources utilisées et les contrôles associés.
Produit Produit finis ou semi-fini obtenu à l'issu d'une gamme de fabrication.
Opération Action spécifique réalisée sur un produit ou un composant, généralement associée à une ressource de production.
Séquence Ordre d'exécution des opérations au sein d'une gamme de fabrication. Elle peut inclure des contraintes temporelles ou logistiques.
Matériel Matière première ou composants nécessaires à l'exécution d'une opération.
Ressource de production Moyen nécessaire à l'exécution d'une opération.
Équipement Machines ou dispositifs physiques utilisés dans le processus de fabrication.
Document Support d'informations nécessaires à l'exécution d'une opération, peut inclure des plans, procédures, instructions de travail …
Divers Ressources diverses nécessaires à une opération, peut inclure des outils spéciaux ou consommables.
Personnel Personne impliquée dans l'exécution d'une opération.
Inspection Caractéristiques spécifiques d'une opération à respecter pour garantir la qualité d'un produit.

Bien que ces classes constituent l'ossature de notre ontologie, d'autres concepts doivent être définis pour assurer une représentation exhaustive. De plus, des relations et cardinalités spécifiques (some, exactly, min, max, only) doivent être précisées.

La **Erreur! Source du renvoi introuvable.** illustre, à l'aide du m odule OntoGraf, la structure générale de notre ontologie, représentant ses 36 classes et leurs relations (simplifiées, sans cardinalité).

4.2.2 Exemple de la classe *GammedeFabrication*

Afin d'obtenir la formalisation complète de la classe *GammedeFabrication*., l'ensemble des classes, relations, cardinalités et autres attributs nécessaires seront définis dans cette partie. Cette représentation s'appuie sur le modèle obtenu en section 3.

Ainsi le Tableau 3 ci-dessous représente l'ensemble des relations dont la gamme de fabrication appartient au domaine de définition (Domain) en donnant également son ensemble d'arrivée, i.e. sa portée (range) ainsi que sa cardinalité.

Tableau 3 : Représentation des relations de la classe GammedeFabrication

Relation	Domaine	Range	Cardinalité
aOperation	GammedeFabrication	Operation	minimum 1
aSequence	GammedeFabrication	Sequence	minimum 1
pourProduire	GammedeFabrication	ProduitdelaGamme	exactly 1
modifiePar	GammedeFabrication	UtilisateurModifieur	
creePar	GammedeFabrication	UtilisateurCreateur	exactly 1
aPourUnite	GammedeFabrication	UnitedeMesure	exactly 1
aStatut	GammedeFabrication	Statut	exactly 1
aVersion	GammedeFabrication	Version	exactly 1
aPourSuiviHistorique	GammedeFabrication	SuiviHistorique	exactly 1
appartientaUsine	GammedeFabrication	Usine	exactly 1

Le modèle commun de l'entête de gamme de fabrication entre ERP et MES contient 14 champs. Chacun des champs non définis a alors été défini par une classe à l'aide de *Data properties*. Le Tableau 4 permet de visualiser cette modélisation.

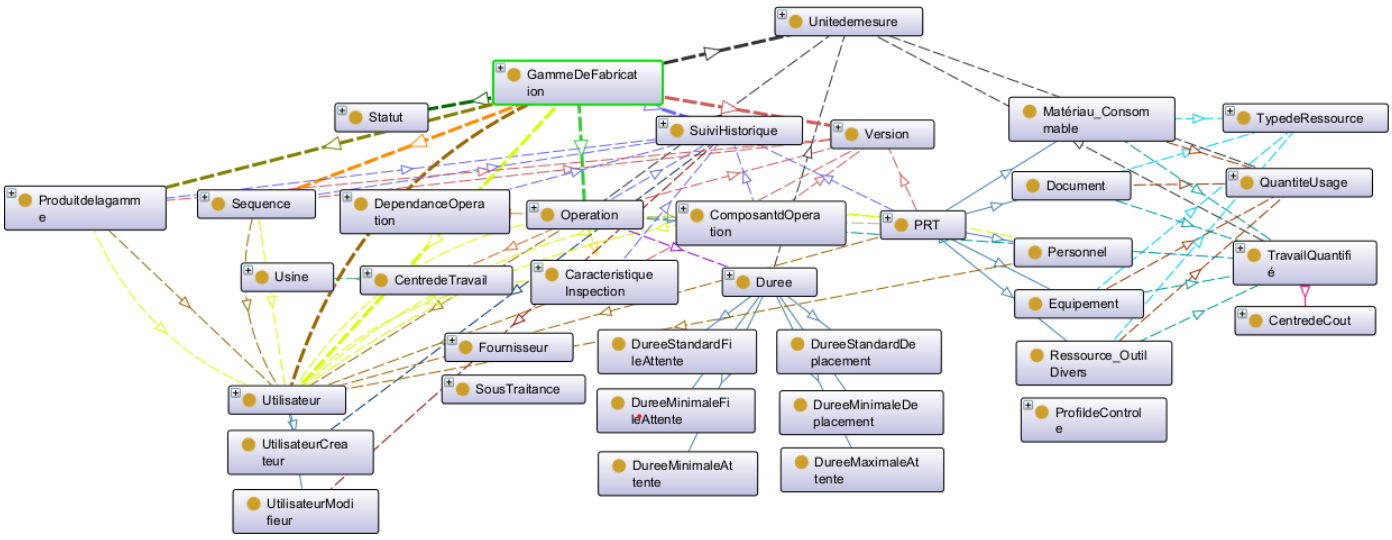
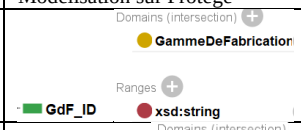
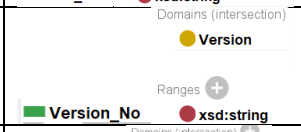
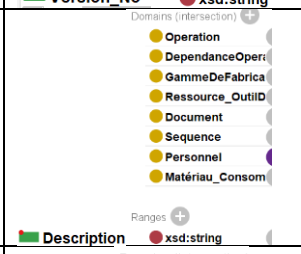
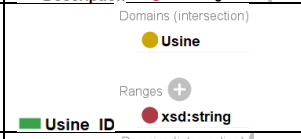
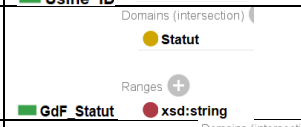
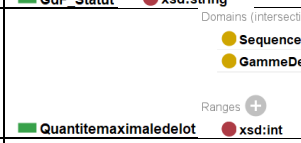
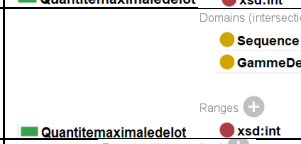
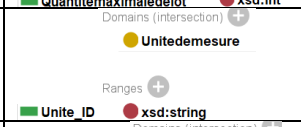
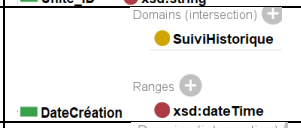
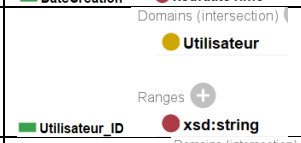
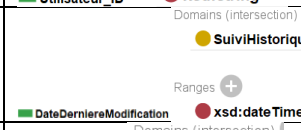
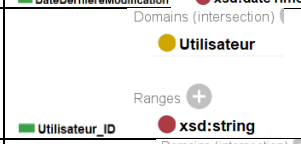
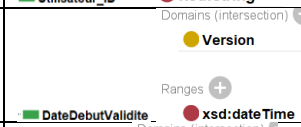
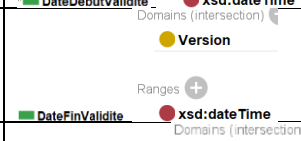
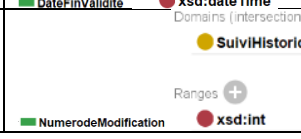


Figure 2 : Graphe du modèle ontologique de la gamme de fabrication OntoIMR

Tableau 4 : Modélisation Protégé des concepts de l'entête de gamme

Modèle commun ERP-MES	Modélisation sur Protégé
Gamme de production Nom/ID	
Version interne de la gamme de production	
Description de la gamme d'opérations	
Usine	
Statut de la gamme d'opérations	
Quantité minimale de lot	
Quantité maximale de lot	
Unité de la gamme d'opérations	
Date de création	
Créé par l'utilisateur	
Date de dernière modification	
Dernière modification par l'utilisateur	
Date de début de validité	
Date de fin de validité	
Numéro de modification	

Cette méthode de modélisation a été appliquée pour chacune des classes définies précédemment, au 4.2.1 afin de définir leur relation. Les *Data properties* de chacune de ces classes ont également été définies afin de représenter l'ensemble des concepts nécessaire d'après le modèle commun de gamme de fabrication ERP-MES.

5 Conclusion

Ce travail a présenté une approche visant à unifier la représentation des gammes de fabrication dans un contexte de couplage ERP-MES. En s'appuyant sur une modélisation ontologique, un modèle structurant les informations essentielles des gammes de fabrication a été proposé. L'ontologie OntoIMR développée offre ainsi une formalisation explicite et réutilisable des concepts clés liés aux gammes de fabrication. Elle constitue une base pour une meilleure interopérabilité entre systèmes industriels hétérogènes.

Afin de valider notre approche, dans des travaux futurs, il faudra appliquer notre modèle ontologique à une gamme de fabrication industrielle réelle. Cette validation permettra d'évaluer la pertinence et la robustesse du modèle en situation concrète, en examinant notamment sa capacité à représenter fidèlement les processus industriels, à faciliter l'échange d'informations et à s'adapter aux contraintes spécifiques des environnements de production. Les résultats de cette validation contribueront à évaluer l'efficacité du modèle et à identifier d'éventuelles améliorations pour une adoption plus large dans l'industrie.

6 Remerciements

Nous tenons à remercier le CRSNG pour son soutien financier, qui a permis la réalisation de cette recherche. Nous remercions également l'ensemble des entreprises ayant contribué à la collecte des données nécessaires à cette étude dont Isitecc.

7 RÉFÉRENCES

Blatt, D. W. E. (1987). A comparison of network and hierarchical data management in large programming projects. *Journal of Systems and Software*, *7*(4), 297-309. https://doi.org/10.1016/0164-1212(87)90029-X

Cattell, R. (2011). Scalable SQL and NoSQL data stores. *ACM SIGMOD Record*, *39*(4), 12-27. https://doi.org/10.1145/1978915.1978919

Gruber, T. R. (1993). A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge Acquisition*, *5*(2), 199-220. https://doi.org/10.1006/knac.1993.1008

Ijmter, E. (2014). Comparison of Relational Database and Object Oriented Database. *International Journal of Modern Trends in Engineering and Research*. https://www.academia.edu/14183866/Comparison_of_Relational_Database_and_Object_Oriented_Database

Musen, M. A. (2015). The protégé project : A look back and a look forward. *AI Matters*, *1*(4), 4-12. https://doi.org/10.1145/2757001.2757003

Oman, S., Leskovar, R., Rossi, B., & Baggia, A. (2017). Integration of MES and ERP in supply chains : Effect assessment in the case of the automotive industry. *Tehnicki Vjesnik - Technical Gazette*, *24*(6). https://doi.org/10.17559/TV-20160426094449

Panetto, H., & Molina, A. (2008). Enterprise integration and interoperability in manufacturing systems : Trends and issues. *Computers in Industry*, *59*(7), 641-646. https://doi.org/10.1016/j.compind.2007.12.010

Phiri, H., & Kunda, D. (2017). Comparative Study of NoSQL and Relational Database. *Zambia ICT Journal*, *1*, 1-4. https://doi.org/10.33260/zictjournal.v1i1.8

Saha, S., Li, W. D., Usman, Z., & Shah, N. (2023). Core manufacturing ontology to model manufacturing operations and sequencing knowledge. *Service Oriented Computing and Applications*, *17*(1), 5-23. https://doi.org/10.1007/s11761-022-00355-3

Shevchenko, N., Moiseienko, K., & Latysheva, O. (2022). Project Implementation of Corporate Information Systems (ERP and MES) as a Guarantee for Increasing the Operational Efficiency of the Enterprise. *Economic Herald of the Donbas*, *4 (70)*, 87-92. https://doi.org/10.12958/1817-3772-2022-4(70)-87-92

Shojaeinasab, A., Charter, T., Jalayer, M., Khadivi, M., Ogunfowora, O., Raiyani, N., Yaghoubi, M., & Najjaran, H. (2022). Intelligent manufacturing execution systems : A systematic review. *Journal of Manufacturing Systems*, *62*, 503-522. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.01.004

Sir, M., Bradac, Z., & Fiedler, P. (2015). Ontology versus Database. *IFAC-PapersOnLine*, *48*(4), 220-225. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.07.036

Staab, S., & Studer, R. (Éds.). (2009). *Handbook on Ontologies*. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-92673-3

Suri, P., & Sharma, M. (2011). A Comparative Study Between the Performance of Relational & Object Oriented Database in Data Warehousing. *International Journal of Database Management Systems*, *3*(2), 116-127. https://doi.org/10.5121/ijdms.2011.3208

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Comment l'IA peut-elle aider au pilotage de projets de développement de logiciels embarqués ?

REDA NADDAM[1,3], CLAUDE BARON[1], YANN ARGOTTI[2]

[1] LAAS-CNRS, Université de Toulouse, INSA Toulouse, CNRS
9 avenue du Colonel Roche, 31077 Toulouse
reda.naddam@laas.fr, claude.baron@laas.fr

[2] AMPERE
2 Av. du Dr Maurice Grynfogel, 31100 Toulouse
yann.argotti@ampere.cars

Résumé
L'objectif de notre travail est d'explorer comment l'intelligence artificielle peut soutenir la prise de décision durant le développement de produits logiciels, afin d'améliorer le pilotage des projets. Le domaine de l'automobile, en pleine mutation vers les Software Defined Vehicles, sera plus particulièrement considéré pour illustration.
La maîtrise du développement de produits logiciels est cruciale, notamment en automobile. Le chef de projet doit avoir une compréhension claire de l'avancement et de l'état courant du projet, et prendre les décisions optimales pour piloter le projet. Il doit pour cela intégrer un ensemble important d'informations, de natures et de sources multiples. Malgré l'existence de nombreuses méthodes et outils, il reste difficile d'appréhender toute la complexité du projet et d'anticiper les différents scénarios possibles cela est dû au manque de côté analytique dans les outils peinent à exploiter efficacement la grande quantité de données générées durant le cycle de vie d'un projet, et offrent peu de support analytique pour la prévision ou l'aide à la décision. Actuellement, les décisions reposent encore en grande partie sur l'expérience individuelle du chef de projet, dans un contexte de plus en plus complexe et dynamique.
Dans ce cadre, l'intégration de modèles prédictifs et de technologies d'intelligence artificielle ouvre de nouvelles perspectives. Des approches basées sur l'apprentissage par renforcement ou le symbolique pour la prise de décision, les LLMs pour la génération de contenu et l'interaction, ou encore les techniques d'apprentissage supervisé ou non supervisé pour la régression, la classification, les systèmes de recommandation, etc… peuvent enrichir les outils actuels de pilotage. Ces technologies permettraient d'améliorer la prévision, l'analyse d'impacts de décisions et d'optimiser les stratégies de pilotage optimales en fonction de divers critères.
Dans ce travail, nous identifions tout d'abord les principales problématiques liées à la gestion de projets agile, sur le plan théorique et d'après l'analyse des besoins exprimés chez Ampère, partenaire industriel de la thèse. Nous répertorions et analysons ensuite les techniques d'intelligence artificielle et identifions leurs applications potentielles pour résoudre les problématiques recensées, en soulignant les bénéfices attendus. Cette analyse nous permettra de proposer une première ébauche d'un système d'aide à la décision destiné aux chefs de projet pour le pilotage de projets de développement de logiciel.

Mots clés - développement logiciel, pilotage de projet, aide à la décision, prédiction, IA, automobile

Abstract –
The objective of our work is to explore how artificial intelligence can support decision-making during software product development, in order to improve project management. The automotive sector, which is currently undergoing a major transformation toward Software Defined Vehicles, will be considered in particular for illustration purposes.
Mastering software product development is crucial, especially in the automotive industry. The project manager must have a clear understanding of the project's progress and current state, and make optimal decisions to steer the project. To do this, they need to integrate a large amount of information from diverse and multiple sources. Despite the existence of numerous methods and tools, it remains difficult to grasp the full complexity of the project and to anticipate various possible scenarios. This is due to the lack of analytical capabilities in current tools, which struggle to effectively exploit the large amount of data generated throughout the project lifecycle and offer limited analytical support for forecasting or decision-making. Currently, decisions still largely rely on the individual experience of the project manager, in an increasingly complex and dynamic context.
In this context, the integration of predictive models and artificial intelligence technologies opens up new possibilities. Approaches based on reinforcement learning or symbolic for decision-making, LLMs for content generation and interaction, as well as supervised learning and unsupervised learning for regression, classification, recommendation systems, etc… can enrich current

project management tools. These technologies could enhance forecasting, impact analysis of decisions, and optimize steering strategies according to various criteria.
In this work, we first identify the main challenges related to agile project management, both from a theoretical perspective and based on the needs expressed by Ampère, the industrial partner of this research. We then catalog and analyze artificial intelligence techniques and identify their potential applications for addressing the identified challenges, highlighting the expected benefits. This analysis will allow us to propose a preliminary outline of a decision-support system intended for project managers in charge of software development projects.

Keywords – software development, project management, decision support, prediction, AI, automotive

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Innover dans le 5S pour l'amélioration de la performance industrielle : retour sur l'expérience de trois PME

LAURIE SERVOZ[1], LAMIA BERRAH[2], FRANCK MAGNET[3], VINCENT CLIVILLE[1]

[1] IAE Université Savoie Mont Blanc
4, chemin de Bellevue, 74940 Annecy France
laurie.servoz@etu.univ-smb.fr

[2] LISTIC, Université Savoie Mont Blanc
5, chemin de Bellevue, 74940 Annecy France
lamia.berrah@univ-smb.fr, vincent.cliville@gmail.com

[3] Pfeiffer Vacuum
98, avenue de Brogny, 74000 Annecy France
franck.magnet@pfeiffer-vacuum.com

Résumé *– Dans un environnement industriel en constante évolution, l'innovation est un axe stratégique majeur, permettant d'assurer la compétitivité des entreprises et d'améliorer leur performance. Accélérée par l'introduction des technologies avancées, l'innovation est présente dans toutes les activités de l'entreprise, en particulier lors de l'exploitation des systèmes industriels. S'intéressant à l'amélioration continue de la performance de ces systèmes industriels, cet article explore la voie de l'innovation dans la méthode d'amélioration continue 5S, comme levier d'amélioration de son efficacité et par-delà même de la performance. L'impact de pratiques innovantes dans le 5S, issues de l'innovation organisationnelle, est étudié. Les pratiques retenues sont fondées sur la digitalisation, la collaboration interservices (par du benchmarking) et la gamification. Une analyse basée sur des enquêtes de benchmarking intersectorielles autour de trois PME (Petites et Moyennes Entreprises) de la région Auvergne-Rhône-Alpes et du canton Genevois confirme l'hypothèse d'une synergie positive entre innovation et 5S.*

Abstract *– In a constantly evolving industrial environment, innovation is a major strategic focus, ensuring the competitiveness of companies and improving their performance. Accelerated by the introduction of advanced technologies, innovation is present in all areas of the company, particularly in the operation of industrial systems, taking various forms depending on the considered field in question. Focusing on the continuous improvement of industrial systems' performance, this article explores how innovation in the 5S continuous improvement methodology can enhance its effectiveness and, by extension, improve performance. The impact of innovative practices in 5S, deduced form organizational innovation and based on digitalization, interdepartmental collaboration (through benchmarking), and gamification is examined. An analysis based on intersectoral benchmarking surveys involving three SMEs (Small and Medium Enterprises) in the French Auvergne-Rhône-Alpes region and Geneva canton confirms the hypothesis of a positive synergy between innovation and 5S.*

Mots clés **- Innovation, 5S, Performance industrielle, Benchmarking, Amélioration continue.**
Keywords – Innovation, 5S, Industrial Performance, Benchmarking, Continuous Improvement.

1 INTRODUCTION

L'amélioration continue offre un grand nombre de méthodes et d'outils destinés à aider les managers industriels dans le pilotage de leurs processus industriels. En particulier, la méthode du 5S apparaît comme un levier incontournable dans le management opérationnel de la performance, en favorisant l'organisation, la propreté et la standardisation des activités autour des postes de travail [Greif, 1997]. Cette méthode permettant de réduire les gaspillages, d'améliorer la sécurité et d'accroître l'efficacité des opérations, elle contribue à une meilleure maîtrise des processus industriels et donc à l'amélioration de leur performance. En revanche, appliquer le 5S de manière conventionnelle peut présenter des freins à cette amélioration. En effet, bien que cette méthode japonaise soit largement reconnue pour son efficacité en matière d'organisation sur le lieu de travail, son application traditionnelle reste essentiellement rattachée à des applications spécifiques et des résultats immédiats [Al-Aomar, 2011]. La vision de l'application traditionnelle du 5S montre ainsi des limites, concernant notamment le renforcement de la standardisation et la garantie de la pérennité des pratiques résultantes. La difficulté à maintenir l'engagement des employés, les problèmes d'homogénéité dans l'application des standards, le risque d'erreurs et le manque de suivis structurants deviennent des obstacles à l'efficacité de la méthode. Un moyen de remédier à ces manques peut se trouver dans l'exploration de la piste de l'innovation, dans sa forme organisationnelle, dans la mise en œuvre du 5S.

Le but de l'étude présentée dans cet article est d'analyser l'apport de l'innovation pout l'efficacité du 5S. La question globale considérée se formule comme suit : *jusqu'où l'innovation dans le 5S peut-elle avoir un impact positif sur la performance industrielle ?* L'hypothèse sous-jacente à cette question est que l'amélioration de l'efficacité d'une méthode d'amélioration continue de la performance va nécessairement dans le sens d'une amélioration de cette performance. En particulier, l'article met en lumière la façon dont les entreprises surmontent les limites du 5S en intégrant des solutions innovantes, en lien avec la digitalisation et les pratiques organisationnelles. Ainsi la digitalisation offre des perspectives d'amélioration en matière de traçabilité, communication, flexibilité et donc de suivi, de standardisation et de pérennité quand de nouvelles pratiques organisationnelles comme la collaboration entre les différents services de l'entreprise ou le management ludique (gamification) peuvent faciliter l'adoption de la méthode et renforcer les échanges de bonnes pratiques. L'approche méthodologique proposée combine résultats théoriques et enquêtes de terrain menées auprès de de trois PME (Petites et Moyennes Entreprises), de secteurs différents, partenaires de cette étude.

Pour ce faire, l'article est organisé comme suit. Dans un premier temps, en section 2, les principes du 5S, son lien à la performance et ses limites sont brièvement rappelés, avant d'étudier dans un second temps la synergie possible entre son efficacité et une intégration de solutions innovantes. En section 3, les solutions d'innovation proposées sont introduites. Les résultats de l'étude menée auprès des trois PME industrielles considérées font l'objet des sections 4 et 5 respectives. La section 4, décrit la méthodologie utilisée, tandis que la section 5 présente les premiers résultats obtenus. Une conclusion et des perspectives finalisent cette étude.

2 PRINCIPES DE LA METHODE 5S, LIMITES ET INNOVATION

Comme annoncé précédemment, cette section décrit dans un premier temps la méthode 5S, introduit dans un deuxième son impact sur la performance industrielle et pour finir analyse, au travers d'un état de l'art de la pratique des entreprises, la synergie entre l'innovation dans l'implémentation du 5S et son efficacité. La question globale précédemment posée (cf. §1) se précise : *dans quelle mesure l'innovation pourrait renforcer l'efficacité du 5S ?* Le focus est mis sur les approches innovantes suivantes : 1°) la digitalisation, 2°) les processus collaboratifs et, 3°) la gamification. Les hypothèses émises sont :

- H1 : La digitalisation améliorant la traçabilité et l'automatisation des différentes étapes de la méthode 5S permet une application rigoureuse et une réduction des erreurs, et est un préalable à la standardisation des pratiques.
- H2 : Les processus collaboratifs facilitant l'échange de bonnes pratiques et l'adaptation aux besoins des entreprises, sont un préalable à l'engagement des employés et à la pérennité des pratiques.
- H3 : La gamification permettant un management ludique et sans pression renforce l'engagement en rendant le 5S plus motivant, et est un préalable à la réussite du 5S.

2.1 Introduction au 5S

Proposée par T. Ōno, la méthode 5S trouve son origine au Japon, au sein du système de production de Toyota (TPS - Toyota Production System) [Osada, 1993], où elle a été développée pour améliorer l'organisation des postes de travail et optimiser l'efficacité des processus industriels [Hirano, 1995] [Greif, 1997]. Son appellation provient des cinq étapes fondamentales qui la constituent et qu'il est nécessaire de mettre en œuvre pour une activité donnée, toutes débutant par la lettre « S » en japonais (Figure 1) [Hirano, 1995].

1. **Seiri (Trier)** : Eliminer les objets inutiles pour ne conserver que ce qui est essentiel à l'activité.
2. **Seiton (Ranger)** : Organiser et disposer les outils et matériaux, liés à l'activité de manière logique et ergonomique pour faciliter l'accès et limiter les pertes de temps.
3. **Seiso (Nettoyer)** : Maintenir un environnement de travail propre pour prévenir les dysfonctionnements lors de l'exécution de l'activité et améliorer la sécurité.
4. **Seiketsu (Standardiser)** : Définir les règles de fonctionnement issues des trois premières étapes et leur intégration dans les habitudes de travail liées à l'activité.
5. **Shitsuke (Respecter et améliorer en continu) :** Instaurer une discipline permettant de suivre et d'améliorer continûment les standards établis pour la performance de l'activité et les rendre pérennes.

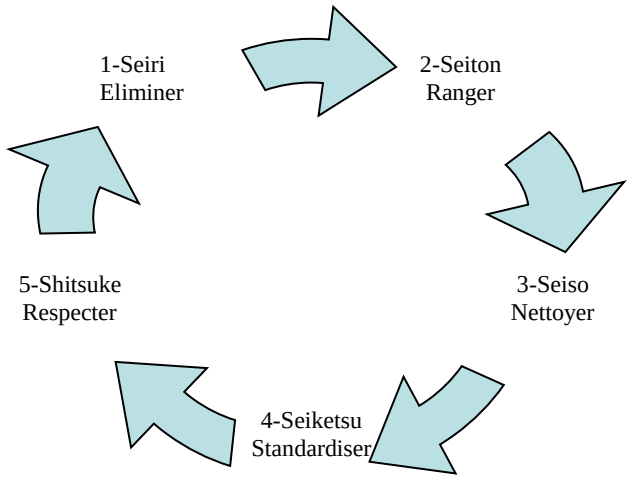


Figure 1. Les cinq étapes de la méthode 5S

2.2 Le 5S et la performance

En sa qualité de méthode d'amélioration continue, l'implémentation d'un 5S a pour objet l'amélioration de la performance. D'une façon générale, celle-ci se traduit par la capacité d'une entreprise à atteindre ses objectifs de manière efficace, efficiente et effective. [Berrah et al., 2018] [Gilbert et al. 1980] (Figure 2).

Du fait de sa globalité, la performance industrielle repose sur la satisfaction d'un certain nombre de critères, notamment le coût (en particulier la productivité), la qualité et le délai [Ding et al., 2021]. L'application du 5S en entreprise a une portée globale et contribue particulièrement à l'amélioration des critères productivité, qualité, sécurité et satisfaction des employés. Il est donc intéressant d'évaluer l'impact du 5S sur la performance industrielle des moyens de production d'une part et du bien-être au travail, d'autre part. Ainsi la productivité s'améliore grâce à une meilleure organisation, ce qui réduit les déplacements inutiles et les pertes de temps. La qualité est renforcée par un environnement ordonné qui diminue les erreurs et garantit la conformité des produits. La sécurité est optimisée en éliminant les risques liés au désordre

et en réduisant les accidents de travail. La satisfaction des employés augmente grâce à un espace structuré qui facilite leur travail et réduit le stress.

Figure 2. Le triangle de la performance [Gilbert et al., 1980]

2.3 Mise en œuvre de la méthode 5S

Pour appliquer la méthode 5S, plusieurs actions doivent être mises en place. Ces actions sont issues des bonnes pratiques observées dans diverses implémentations du 5S et documentées dans la littérature [Gupta, 2022a].

- Sensibilisation et formation : Impliquer les employés à travers des sessions de formation pour expliquer les objectifs et les bénéfices du 5S.
- Implication du management : Engager fortement et concrètement le top management pour le suivi et l'application des bonnes pratiques, en veillant à l'allocation des ressources nécessaires et à l'intégration du 5S dans la culture d'entreprise.
- Audit et diagnostic initial : Évaluer l'état actuel des postes de travail afin d'identifier les points d'amélioration à considérer lors de la mise en œuvre du 5S.
- Mise en place progressive : Appliquer chaque étape du 5S de manière progressive et méthodique en intégrant des indicateurs de suivi de la mise en œuvre.
- Évaluation et amélioration continue : Réaliser des audits réguliers et ajuster les actions pour garantir le succès et la pérennité de la démarche.

La méthode du 5S, lorsqu'elle est appliquée « correctement », permet d'améliorer la performance, tout en instaurant une culture d'amélioration continue. L'enjeu reste à bien saisir les conditions liées à l'application « correcte » de la méthode.

Plus précisément, la méthode 5S est largement appliquée et connue dans divers secteurs industriels et tertiaires en raison de sa simplicité d'une part et son impact direct, immédiat et palpable sur l'organisation du travail, la sécurité, la productivité et la qualité d'autre part (cf. §2.2). Initialement développée dans l'industrie manufacturière autour de l'activité de production (cf §2.1), la méthode 5S s'est progressivement étendue à d'autres activités, au-delà de la production comme la logistique interne et externe (supply chain), les services administratifs et les environnements de bureau [Chourasia et Nema, 2016].

2.4 Limites du 5S traditionnel

L'application de la méthode du 5S a démontré des résultats significatifs en matière d'amélioration de la performance [Gupta, 2022b]. Toutefois, si les résultats obtenus sont satisfaisants dans l'immédiateté, il n'en est pas de même dans la durée. En l'occurrence, l'un des principaux défis liés à l'implémentation du 5S réside dans la standardisation et la pérennisation des pratiques. En effet, si les trois premières étapes du 5S (cf. §2.1) sont généralement bien adoptées et donnent les résultats escomptés, les deux dernières étapes de standardisation (Seiketsu) et de discipline (Shitsuke) sont plus difficiles à maintenir sur le long terme. Les défis potentiels de la mise en œuvre du 5S, relevés dans la littérature, sont nombreux [Sati et al., 2019].

- Limites de généralisation et difficultés de standardisation : Les résultats obtenus dans une entreprise ou un secteur donné ne sont pas toujours directement transposables à d'autres contextes. En effet, l'application du 5S peut varier d'une activité ou d'un service à l'autre, rendant la standardisation complexe, surtout dans des organisations multi-sites.[Sati et Adam, 2019].
- Difficultés d'application et résistance au changement : Les employés peuvent faire preuve de résistance au changement obtenu à l'issue de l'implémentation du 5S. Ils peuvent percevoir le 5S comme une contrainte, surtout s'ils n'en comprennent pas les bénéfices ou craignent une surcharge de travail. Peu de méthodes sont proposées pour le maintien des standards après la mise en œuvre [Omogbai et Salonitis, 2017].
- Nécessité de l'implication active de la direction et des employés : Le projet de mise en œuvre du 5S repose sur un investissement à la fois financier et humain. Comme pour tout projet, la motivation peut entraver l'engagement et l'enthousiasme de l'équipe.
- Risque d'essoufflement : Sans actions de suivi régulières, l'enthousiasme initial peut diminuer, rendant difficile le maintien et la pérennité des pratiques du 5S et induisant un retour progressif aux anciennes habitudes de travail.
- Nécessité d'une communication claire : une absence de communication peut engendrer des malentendus, des erreurs et une désorganisation.

Face à ces limites, il apparaît opportun de repenser l'approche traditionnelle du 5S, l'adoption innovante de nouvelles technologies et de méthodes collaboratives constitue une opportunité en cela. Ajoutons que pour faire face aux limites de généralisation et difficultés de standardisation de l'innovation dans une démarche 5S, nous proposons d'utiliser le benchmarking, méthode de collecte d'information adaptée aux contextes de comparaison entre activités, processus ou entreprises.

2.5 Engagement croissant des entreprises dans l'innovation

Face à un environnement économique en constante évolution, les entreprises, quelle que soit leur taille investissent régulièrement dans l'innovation afin d'améliorer leur compétitivité et leur agilité [Hossain, 2015]. En particulier, l''innovation organisationnelle qui peut globalement se définir comme : « l'introduction de nouvelles pratiques, structures ou processus au sein d'une entreprise afin d'améliorer son efficacité, sa flexibilité et sa performance globale » [Dubouloz et Bocquet, 2013] est souvent le premier levier considéré. L'innovation organisationnelle apparaît comme une voie d'innovation propice dans cette étude (cf. §2), pouvant concerner la gestion des ressources humaines, les modes de production, la culture d'entreprise ou, plus généralement la prise de décision relative à toute activité liée à l'organisation considérée [Morrar, 2014].

L'adoption de l'innovation organisationnelle repose sur plusieurs leviers stratégiques [Tidd, 2006] décrits ci-après.

- LS 1 - Amélioration de la gestion des compétences : En intégrant des pratiques collaboratives, les entreprises favorisent le développement des savoir-

faire et la montée en compétence des employés, réduisant ainsi les silos organisationnels. Ces derniers désignent des barrières internes qui se forment lorsque les services, départements ou équipes fonctionnent de manière isolée, avec une communication et une collaboration limitées. En brisant ces cloisonnements, les entreprises améliorent la circulation de l'information, facilitent la prise de décision et renforcent l'innovation, contribuant ainsi à une organisation plus agile et performante.

- LS2 - Augmentation de la réactivité : La mutualisation des expériences et des ressources permet aux entreprises d'anticiper plus rapidement les évolutions du marché et d'adapter leurs processus en conséquence.
- LS3 - Optimisation de l'environnement de travail : Une organisation plus souple et plus participative améliore l'efficacité des équipes, favorise l'engagement des employés et renforce la culture de l'amélioration continue.

Dans le cadre de cette étude, il est intéressant de « croiser » ces leviers stratégiques avec les trois approches innovantes retenues (cf §2) et décrites en section 3, pour vérifier la couverture de ces leviers (Tableau 1). Nous y ajoutons le benchmarking, qui bien que ne pouvant être qualifié de pratique innovante, contribue également à la couverture des leviers stratégiques. On peut constater que l'ensemble des solutions d'innovation retenues permet de couvrir les trois leviers stratégiques.

Tableau 1. La couverture des leviers stratégiques par les solutions d'innovation

Levier stratégique **Solution d'innovation**	**LS1**	**LS2**	**LS3**
Digitalisation		x	
Les processus collaboratifs	x		
La gamification			x
Le Benchmarking	x	x	x

3 INTEGRATION DE L'INNOVATION DANS LE 5S

Le postulat posé dans cet article est que l'intégration de pratiques innovantes dans le 5S permet d'améliorer son efficacité et son adoption au sein des entreprises, et donc, in fine, la performance. Cette section explore les pratiques innovantes suivantes : la **digitalisation**, la **collaboration interservices** et la **gamification** (cf. H1, H2 et H3 §2). La digitalisation facilite le suivi en temps réel et l'optimisation des processus, tandis que la collaboration interservices renforce l'engagement des équipes et améliore la gestion des ressources. La gamification, quant à elle, stimule la motivation des employés et accélère l'adoption de la méthode.

Comme évoqué plus tôt (cf. §2.4), le benchmarking permet d'intégrer ces innovations Cette méthode permet d'évaluer l'efficacité de l'application des pratiques innovantes en comparant la performance obtenue à la meilleure performance d'autres processus et/ou d'autres entreprises. Le benchmarking aide à ajuster les stratégies en fonction des résultats observés et à identifier les actions les plus pertinentes à adopter.

Pour augmenter l'efficacité de la mise en œuvre du 5S, en particulier sur ses deux dernières étapes (cf. §2.1), et maximiser leur impact sur la performance industrielle (cf. §2.2), les approches innovantes retenues dans cette étude sont introduites ci-après.

3.1 Digitalisation : Utilisation d'outils numériques

La digitalisation améliore l'efficacité de la méthode en permettant un suivi en temps réel des audits à l'aide d'outils numériques comme des applications mobiles et des plateformes cloud. Ces outils permettent de capturer des photos, valider des améliorations et signaler des points à corriger, ce qui est essentiel pour la dernière étape de la méthode. En facilitant un suivi continu et en garantissant une mise à jour régulière des pratiques, la digitalisation assure le maintien de la méthode 5S sur le long terme, tout en facilitant l'engagement des équipes dans l'amélioration continue.

Une approche innovante est l'intégration de questions spécifiques aux étapes du 5S dans les audits réalisés, permettant une évaluation ciblée du maintien des étapes de la méthodes 5S. Le Tableau 2 en donne une illustration, extraite d'un des partenaires de l'étude (la société Pfeiffer Vacuum). Les audits, autrefois effectués sur papier, sont désormais numérisés. Les réponses aux questions sont collectées et analysées, grâce aux technologies avancées, afin d'assurer la traçabilité des audits des mois précédents et de suivre leur évolution. Cela fournit une vision plus précise des progrès et des lacunes, facilitant l'analyse des données et la gestion des actions correctives, augmentant ainsi la réactivité dans la prise de décision. Avec la digitalisation, la mise en œuvre du 5S devient plus efficace, car elle offre une centralisation des informations, une visualisation instantanée des indicateurs de performance et une meilleure communication entre les équipes.

Enfin, la digitalisation contribue à la pérennisation du 5S en rendant les bonnes pratiques plus accessibles et en intégrant des rappels et alertes automatisés pour éviter les dérives. Par exemple, des outils comme « iAuditor » permettent aux managers de réaliser des audits 5S en temps réel, en prenant des photos des zones de travail et en validant les améliorations directement sur l'application. De plus, des plateformes comme « Trello » ou « Asana » peuvent être utilisées pour planifier des actions correctives, assigner des tâches et suivre les progrès, avec des rappels réguliers pour assurer la constance des actions. Ces outils renforcent l'engagement des employés en facilitent leur implication dans l'amélioration continue, garantissant ainsi une adoption durable des standards établis. Ces applications jouent un rôle clé dans la pérennisation du 5S, en maintenant les équipes concentrées sur les objectifs à long terme et en assurant une réévaluation constante des processus.

Tableau 2. Exemples de questions dans l'audit digitalisé sur la propreté- rangement (pratique de Pfeiffer Vacuum)

PROPRETE - RANGEMENT
Les postes de travail sont-ils correctement rangés-?
Chaque collaborateur veille-t-il à maintenir la propreté de son poste de travail ?
L'environnement de travail commun est-il rangé/ organisé (machines, tableaux, armoires, établis, étagères…) ?
L'environnement de travail commun est-il propre (machines, tableaux, sol, murs, armoires, établis, étagères...) ?
Les documents et éléments inutiles ou inutilisés sont-ils éliminés ou archivés ? Seuls le matériel et les informations nécessaires se trouvent dans la zone de travail ?

Les documents et standards "Nos Fondamentaux" sont-ils en place, à jour et respectés selon le guide (plan espace, affiche dans la salle de réunion, standard(s) du poste, photo 5S, kit de nettoyage, affichages datés et à jour, logos à jour...) ?
Les marquages des allées et des zones sont-ils conformes aux standards et mis à jour par l'équipe ? Les marquages défectueux sont-ils signalés au responsable et réparés immédiatement ?
La synthèse de l'audit précédent, accompagnée des remarques a-t-elle été imprimée, signée par le manager, présentée et les remarques ont-elles été prises en compte ?

3.2 Collaboration interservices : Intégration du 5S dans tous les départements

Une deuxième approche innovante pour maximiser l'impact de la méthode du 5S consiste à étendre son application à l'ensemble des services et départements de l'entreprise, et non pas seulement dans la zone usuelle de production (cf. §2.1). En effet, un « chantier » 5S peut être mis en place autour de toute activité, dès lors que l'objectif est une plus grande efficacité au travail (cf. §2.2). Au travers des différents chantiers menés auprès des industriels que nous décrivons ultérieurement et de la revue de la littérature (cf. §2.3), il ressort que la gestion des étapes du 5S ne doit pas être perçue uniquement comme une démarche technique ou ponctuelle. Au contraire, elle doit être considérée comme une culture transversale, impliquant l'ensemble des équipes à tous les niveaux. C'est cette approche collaborative et continue qui garantit l'homogénéité et la pérennité de la méthode 5S dans l'entreprise et plus particulièrement des étapes de standardisation et pérennisation (cf. §2.1) et pour laquelle aucune méthode n'est disponible. Par exemple, au-delà des équipes de production, les services comme la maintenance, les achats, la logistique, ou même les ressources humaines peuvent bénéficier de la mise en œuvre du 5S (cf. §2.4). Cela permet une harmonisation des pratiques, réduit les gaspillages dans des processus non directement liés à la production et assure que l'ensemble de l'organisation travaille dans un environnement propre, organisé et optimisé ; permettant ainsi des améliorations palpables de la performance (cf. §2.2). L'idée ici est juste d'inciter les services de l'entreprise à entreprendre des démarches 5S, de se benchmarker et de constater les gains potentiels.

3.3 Gamification : Rendre l'application de la méthode 5S plus engageante

Pour gagner en efficacité sur les deux dernières étapes du 5S, à savoir la standardisation et la pérennisation (cf. §2.1), la gamification peut être une approche intéressante. Il s'agit de rendre l'implémentation du 5S plus ludique et plus motivante pour les équipes, en introduisant des éléments de jeu, des défis internes et des récompenses. Par exemple, les employés pourraient participer à des concours de propreté et d'organisation, où les équipes seraient évaluées selon des critères de performance 5S tels que le respect des standards de rangement, la réduction des écarts, la qualité des audits internes et l'implication. Ces défis pourraient être accompagnés de systèmes de points ou de récompenses pour stimuler l'esprit de compétition et renforcer l'engagement. La gamification, pratiquée dans plusieurs domaines, permet de rendre le 5S plus attractif et de renforcer l'implication des employés, en transformant ce qui pourrait être perçu comme une contrainte en une activité valorisante et à valeur ajoutée.

Les témoignages des trois PME partenaires de cette étude, résumés dans les sections suivantes, vont maintenant nous aider à valider nos hypothèses quant à l'introduction des solutions innovantes proposées.

4 TEMOIGNAGES INDUSTRIELS : METHODOLOGIE

4.1 Choix des entreprises et terrain d'étude

Cette partie présente une analyse de la pratique du 5S, pour trois entreprises industrielles, PME, issues de secteurs variés : 1°) l'entreprise Pfeiffer Vacuum spécialisée dans les technologies du vide et co-auteure de cet article, 2°) une entreprise A proposant des solutions industrielles et mécatroniques, et 3°) une entreprise B spécialisée dans l'horlogerie et la joaillerie de luxe. Les deux dernières entreprises ont souhaité préserver leur anonymat.

Le choix de limiter l'échantillon à trois entreprises présente plusieurs avantages [Eisenhardt, 1989] :

- Approfondissement de l'analyse : En se concentrant sur un nombre restreint d'entreprises, il a été possible de mener une étude plus détaillée incluant des observations approfondies et des entretiens semi-directifs avec les responsables opérationnels et les employés.
- Meilleure compréhension des processus internes : Une étude plus ciblée a permis d'examiner les dynamiques spécifiques à chaque entreprise, ce qui aurait été plus difficile avec un échantillon plus large nécessitant une analyse moins approfondie.
- Exploration des pratiques innovantes : Plutôt que de se focaliser sur des tendances générales, cette approche a permis d'identifier des leviers d'innovation concrets et directement applicables dans d'autres contextes industriels.

De plus, le choix d'entreprises issues de secteurs différents constitue également un atout méthodologique, offrant les opportunités regroupées dans le Tableau 3 [Eisenhardt, 1989].

Tableau 3. Opportunités d'un échantillon de secteurs variés

Opportunité	Description
Diversité des applications du 5S	Identification de la manière dont les principes du 5S sont adaptés et leur utilisation améliorée en fonction des contraintes spécifiques à chaque secteur
Comptabilité des résultats	Extraction des tendances communes et d'identification des pratiques transférables à d'autres secteurs
Validation de l'universalité des bénéfices du 5S	Analyse commune et universelle des impacts de l'intégration de l'innovation dans le 5S, indépendamment du secteur

4.2 Construction et administration des questionnaires

L'approche adoptée pour la collecte des témoignages au sein des trois PME partenaires de cette étude repose sur la distribution d'un questionnaire à ces entreprises. Les questions ont été posées en présentiel lors des visites pour deux des trois PME, et sous forme de questionnaire pour l'entreprise dont la visite n'a pas pu être réalisée. Une première visite d'une demi-journée dans la PME A, spécialisée dans les solutions industrielles et mécatroniques, a permis de recueillir des données. L'entretien en présentiel, d'une durée moyenne de 90 minutes, a réuni les responsables, les opérateurs et les pilotes des chantiers 5S. La collecte des données pour l'entreprise Pfeiffer Vacuum s'est quant à elle étendue sur plusieurs mois.

Les informations collectées directement auprès des acteurs sur le terrain ont permis de mieux comprendre et identifier les :

- enjeux ci-après ;
- défis rencontrés ;
- résistances potentielles ;
- obstacles à surmonter ;
- opportunités d'une implémentation innovante du 5S.

Cette première analyse a ainsi permis d'identifier précisément les facteurs humains et organisationnels qui influencent la mise en place des 5S dans un contexte industriel. Pour la PME B, le benchmarking a été effectué à travers un questionnaire envoyé par voie électronique, ainsi que des échanges, par la même voie, pour clarifier toute ambiguïté éventuelle sur les questions. Les responsables, opérateurs et pilotes des chantiers 5S ont pu remplir le questionnaire, transmis successivement aux différents acteurs concernés. La durée estimée pour cette collecte est d'environ 60 minutes par questionnaire.

Conformément aux indicateurs de performance utilisés dans les processus internes de ces entreprises le questionnaire a été conçu pour relever les améliorations perçues selon les quatre critères retenus précédemment (cf §2.2) : la productivité, la qualité, la sécurité et la satisfaction des employés. Il permet d'obtenir une idée de l'impact des innovations du 5S sur les critères considérés. Pour ce faire, Le questionnaire a été construit conformément aux axes suivants :

- Innovation et mise en œuvre : adaptation aux contraintes de l'entreprise, obstacles rencontrés, intégration dans la stratégie.
- Collaboration et innovation : initiatives, partenariats externes, facteurs favorisant l'innovation.
- Perception et engagement : avis des employés et de la direction, influence sur la culture d'entreprise.
- Résultats et performance : bénéfices observés, défis, impact sur la compétitivité.

Chaque axe est exploré à travers une série de questions ouvertes et fermées adaptées à la nature des informations recherchées. Les questions fermées sont utilisées lorsque des données objectives et mesurables sont nécessaires, notamment dans l'axe « Résultats et performance » pour évaluer les critères de performance considérés. Elles permettent une analyse statistique des réponses et facilitent la comparaison des résultats entre les répondants. À l'inverse, les questions ouvertes sont privilégiées pour recueillir des perceptions, des expériences ou des exemples concrets. Elles offrent aux répondants la possibilité d'exprimer leur point de vue, d'identifier des obstacles ou de proposer des améliorations. Dans un souci de concision et à des fins d'illustration, le Tableau 4 donne un exemple de quelques questions posées.

Tableau 4. Exemples de questions posées

Axe	**Exemple de question**
Innovation et mise en œuvre	Comment les étapes du 5S sont-elles adaptées aux contraintes spécifiques de votre entreprise (économiques, environnementales, budgétaires), notamment via des outils numériques ou digitaux ?
Collaboration et innovation	L'entreprise cherche-t-elle activement à innover dans sa mise en œuvre du 5S, par exemple via la digitalisation (tableaux de bord digitaux, applications, capteurs) ou la gamification (challenges, récompenses) ?
Collaboration et innovation	Comment la communication interservices a-t-elle été améliorée grâce aux innovations du 5S (outils collaboratifs, feedback en temps réel, plateformes digitales) ?
Perception et engagement	Quelle est la perception des employés et de la direction quant aux innovations dans le 5S, en particulier l'introduction de la digitalisation ou de la gamification ?
Résultats et performance	Quels indicateurs sont utilisés pour mesurer la performance avant et après l'implémentation des innovations du 5S ?

5 TEMOIGNAGES INDUSTRIELS : RESULTATS

Cette section présente quelques résultats préliminaires de sorte à confirmer les hypothèses H1, H2 et H3 (cf. §2).

5.1 L'apport de l'innovation pour l'application du 5S

Le Tableau 5 propose une analyse des effets des innovations sur les résultats obtenus à la suite de la mise en œuvre du 5S. Cette approche méthodologique ne se limite pas à une simple application des principes du 5S, mais vise à en évaluer l'impact à travers plusieurs dimensions essentielles. Le but est d'appréhender la manière dont ces innovations influencent l'efficacité opérationnelle, la pérennisation du 5S dans l'entreprise et la performance industrielle. Ces dimensions ont été rigoureusement sélectionnées en raison de leur rôle central dans l'analyse comparative des différentes stratégies de déploiement du 5S. Elles permettent d'évaluer la profondeur de l'intégration de cette démarche, son efficacité en matière d'amélioration continue et sa capacité à générer des bénéfices tangibles sur le long terme. En identifiant ces leviers, il devient possible d'établir un cadre analytique permettant non seulement de mesurer la performance du 5S, mais aussi de mieux comprendre les facteurs conditionnant son succès. Ainsi, ces dimensions ne sont pas seulement des indicateurs descriptifs ; elles servent également d'outils d'aide à la décision pour orienter les choix stratégiques des entreprises souhaitant optimiser leur démarche 5S. Elles permettent d'examiner comment l'approche initiale influe sur l'adhésion des employés, comment la gestion des risques contribue à une meilleure anticipation des problèmes, ou encore comment la standardisation et la pérennisation assurent une continuité et une amélioration des pratiques dans le temps. L'analyse de ces dimensions est donc essentielle pour établir des comparaisons entre différentes expériences de mise en œuvre du 5S et identifier les bonnes pratiques favorisant son ancrage durable dans les organisations.

Les différentes dimensions identifiées dans ce cadre sont données ci-dessous avant de les illustrer par quelques exemples.

- Approche initiale : Une introduction bien structurée du 5S conditionne son acceptation et son efficacité. Elle influence la mobilisation des équipes et la cohérence de sa mise en œuvre.
- Gestion des risques : L'anticipation et la résolution efficace des problèmes limitent les perturbations et renforcent la sécurité. Une approche proactive améliore la qualité et la stabilité des processus.
- Standardisation : Maintenir et améliorer les standards garantit la continuité des bonnes pratiques. Cela permet d'éviter un retour aux anciennes habitudes et d'assurer une amélioration continue.
- Pérennisation : L'intégration du 5S dans la culture d'entreprise prévient son essoufflement. Une

structuration adaptée favorise son ancrage durable et son application sur le long terme.

- Compétences et collaboration : Le partage des savoirs et l'échange inter-équipes renforcent l'efficacité du 5S. Une collaboration élargie facilite l'innovation et l'évolution des pratiques.
- Impact sur la performance : Le 5S vise l'amélioration de la productivité, de la qualité et de la satisfaction des employés. Cette dimension mesure les bénéfices concrets et oriente les ajustements nécessaires.

Le contenu du tableau résulte de l'analyse des données collectées dans les trois PME grâce aux réponses aux trois questionnaires obtenues.

Tableau 5. Analyse comparative

Dimension	5S traditionnel	5S enrichi par l'innovation
Approche initiale	Formation simple et application terrain	Benchmarking entre entreprises pour identifier les meilleures pratiques
Gestion des risques	Réactive, résolution de problèmes	Proactive, anticipation des risques qualité et sécurité grâce au partage d'expérience
Standardisation	Difficultés à maintenir les standards	Intégration de standards éprouvés et adaptés grâce aux retours d'expérience
Pérennisation	Faible, manque de suivi structuré	Approche structurée et partagée, ancrage de la méthode dans la culture d'entreprise
Compétences et collaboration	Concentration sur les équipes internes, compétences limitées	Diversité des compétences grâce à l'échange inter-entreprises et aux partenariats stratégiques
Impact sur la performance	Résultats temporaires, amélioration limitée	Amélioration durable, productivité, qualité, sécurité, satisfaction des employés

L'amélioration des résultats obtenus grâce à l'innovation dans le 5S repose sur plusieurs mécanismes clés mis en évidence dans le tableau. Tout d'abord, l'intégration du benchmarking dans l'approche initiale permet aux entreprises de capitaliser sur les meilleures pratiques existantes, favorisant ainsi une mise en œuvre plus efficace et adaptée aux réalités du terrain. Ensuite, le passage d'une gestion des risques réactive à une approche proactive, s'appuyant sur l'anticipation des problèmes et le partage d'expérience, réduit considérablement les perturbations et renforce la sécurité et la qualité des processus.

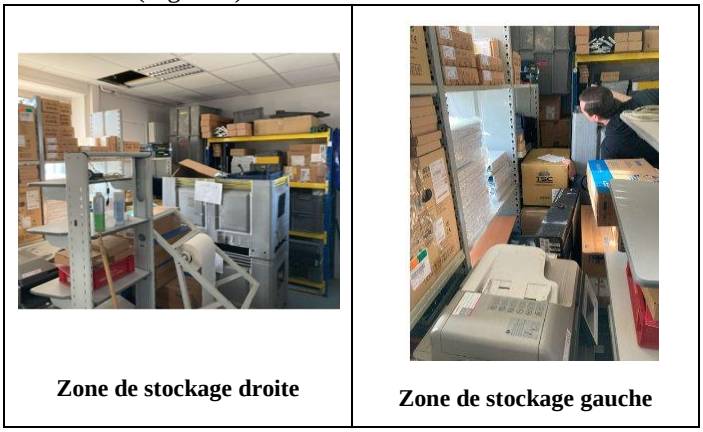
Par ailleurs, la standardisation, qui constitue souvent un défi dans le cadre du 5S traditionnel, est améliorée grâce à l'intégration de standards éprouvés et continuellement ajustés en fonction des retours d'expérience. Cette évolution garantit une plus grande stabilité opérationnelle et facilite l'amélioration continue. De même, la pérennisation du 5S ne repose plus uniquement sur des initiatives ponctuelles, mais sur une approche structurée et partagée, favorisant un ancrage durable dans la culture d'entreprise.

En termes de compétences et de collaboration, l'ouverture à des échanges inter-entreprises et à des partenariats stratégiques permet de diversifier les compétences disponibles, offrant ainsi une meilleure adaptabilité et une diffusion plus large des bonnes pratiques. Enfin, l'impact sur la performance globale se traduit par une amélioration durable de la productivité, de la qualité, de la sécurité et de la satisfaction des employés, contrairement au 5S traditionnel, dont les résultats sont souvent limités et temporaires.

Ces résultats démontrent que l'enrichissement du 5S par l'innovation contribue non seulement à optimiser son efficacité à court terme, mais également à en assurer la viabilité et l'impact positif sur le long terme.

5.2 Quelques résultats opérationnels

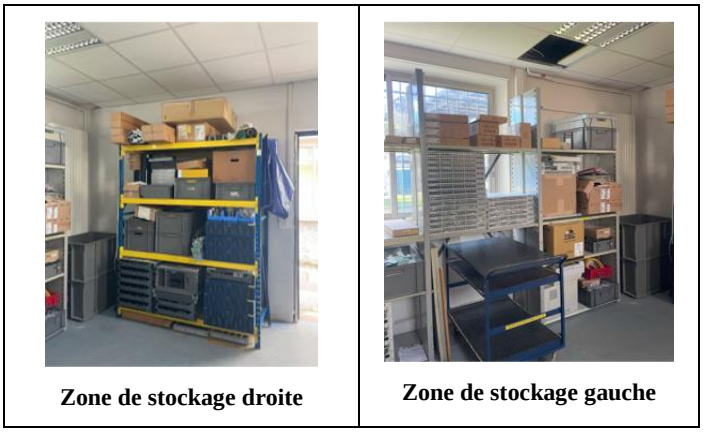
Au-delà de cette analyse tendancielle, la collaboration avec les entreprises partenaires, dont l'entreprise Pfeiffer Vacuum a permis d'opérationnaliser cet apport de l'innovation dans la méthode 5S au travers de quelques chantiers menés dans l'entreprise et de comparer les résultats des deux approches, la traditionnelle et celle enrichie par l'innovation. Avant l'introduction des outils numériques et de la gamification, les espaces de travail et zones de stockage étaient souvent désorganisés entraînant une gestion inefficace du temps et des ressources (Figure 3).



Zone de stockage droite | **Zone de stockage gauche**

Figure 3. Zone de stockage avant le 5S

L'intégration d'innovations dans le 5S a permis d'impliquer davantage les équipes, y compris celles externes au service, grâce à des audits plus interactifs et des questions ciblées. Après la mise en place de ces nouvelles approches, en particulier la communication interservices et la digitalisation, la zone de travail apparaît bien plus claire et ordonnée (Figure 4). Ces améliorations se traduisent également par une réduction des erreurs et des incidents de sécurité, démontrant ainsi l'impact direct sur les critères de performance considérés.



Zone de stockage droite | **Zone de stockage gauche**

Figure 4. La zone de stockage avec le 5S enrichi par l'innovation

Ces résultats ont été atteints en deux jours. Pour cela**,** plusieurs actions s ont été mises en place de manière successive et complémentaire. Tout d'abord, une formation a été dispensée pour sensibiliser les équipes aux principes fondamentaux du 5S, en soulignant l'importance de cette méthode pour améliorer à la fois l'efficacité et l'organisation du travail. Dans un second temps, la digitalisation des audits 5S a été réalisée (cf. Tableau 2), ce qui a facilité la collecte et le suivi des données relatives aux zones auditées.

Par ailleurs, un benchmark a été effectué en collaboration avec le service d'Amélioration Continue, dans le but d'analyser et de comparer les bonnes pratiques à mettre en œuvre dans la PME A. Ces bonnes pratiques ont ensuite été appliquées dans l'entreprise, notamment à travers la réalisation d'audits 5S impliquant activement chaque membre du service. Le but était de faire prendre conscience de l'importance de la méthode 5S, tout en incitant à comprendre leur rôle actif de chacun dans l'optimisation de leur environnement de travail, notamment en soulignant l'importance de chaque espace, y compris ceux faisant partie de leur zone de travail. Suite à cela, le ressenti des acteurs a révélé une meilleure compréhension de l'utilité de la méthode. Un rituel hebdomadaire de 5S, d'une durée de 1 à 2 heures chaque vendredi, a été instauré pour maintenir l'implication des équipes et garantir l'efficacité à long terme.

Enfin, les perspectives sur le terrain prévoient d'étendre la pratique des 5S à d'autres zones des services, telles que les bureaux et d'autres de leurs espaces de stockage, dans le but de garantir une gestion optimisée et de favoriser une amélioration continue à l'échelle de l'ensemble de l'entreprise.

6 CONCLUSION

L'analyse menée met en évidence que l'intégration de solutions d'innovations dans la méthode 5S ouvre de nouvelles perspectives, dépassant les limites de son application traditionnelle. D'une part, la digitalisation, illustrée par l'utilisation d'outils numériques pour la réalisation d'audits en temps réel, offre une traçabilité précise des actions et un suivi automatisé des écarts. Cela permet aux entreprises d'identifier rapidement les dysfonctionnements et de mettre en œuvre des actions correctives adaptées, tout en facilitant la pérennisation des standards établis. D'autre part, la collaboration interservices, en étendant l'application du 5S à l'ensemble des départements (production, maintenance, logistique, ressources humaines, etc.), favorise une homogénéisation des pratiques et un échange constant de bonnes pratiques. Cette approche permet de briser les silos internes et d'assurer une meilleure coordination, indispensable pour garantir une mise en œuvre uniforme et durable du 5S. Enfin, la gamification, en introduisant des éléments ludiques tels que des challenges et des systèmes de récompense, transforme l'adhésion au 5S en une expérience motivante et engageante pour les employés. Ce levier renforce l'implication des équipes en faisant de la démarche d'amélioration continue une source de reconnaissance et de stimulation, plutôt qu'une simple contrainte opérationnelle.

Nous pouvons considérer que l'intégration de solutions innovantes proposées - la digitalisation, la collaboration interservices et la gamification - permet de renforcer l'efficacité de la méthode 5S en rendant son application plus interactive et plus en phase avec les évolutions technologiques et organisationnelles. Conjointe ou séparée, cette intégration promet non seulement d'améliorer les résultats immédiats du 5S, mais aussi de promouvoir une culture d'amélioration continue, tout en favorisant une plus grande adhésion. Les études de cas menées auprès des trois PME analysées confirment cette impression, qu'il reste à quantifier et formaliser. Une analyse quantitative ainsi qu'une exploration d'autres solutions d'innovation sont la perspective immédiate de cette ébauche préliminaire, pour une performance industrielle durable et résiliente.

7 REFERENCES

Al-Aomar, R. A. (2011). Applying 5S LEAN Technology: An infrastructure for continuous process improvement. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 59, 2014-2019.

Berrah L., Clivillé V., Foulloy L. (2018). *Objectifs et performances industriels.* ISTE Editions, 232 p., Systèmes et génie industriel, Jean-Paul Bourrières, ISBN : 978-1-78405-433-5.

Chourasia, R., Nema DR. A. (2016). Review on implementation of 5S methodology in the services sector. *International Research Journal of Engineering and Technology IRJET*, 3(4).

Ding, B., Ferràs Hernández, X., & Agell Jané, N. (2021). Combining lean and agile manufacturing competitive advantages through Industry 4.0 technologies: an integrative approach. *Production Planning & Control*, 34(5), 442–458.

Dubouloz, S., Bocquet R (2013). Innovation organisationnelle : S'ouvir pour innover plus. *Revue française de gestion*, 39(235).

Eisenhardt, K. M. (1989). Building Theories from Case Study Research. *Academy of Management Review*, 14(4), 532-550.

Gilbert, G.R., Collins, R.W., Brenner, R. (1980). *Age and leadership effectiveness: From the perceptions of the follower.* Human Resource Management, 29(2), 187–196.

Greif, Michel (1997). 5S : Le management de l'espace. *Revue Française de Gestion Industrielle*, 16(3).

Gupta, Kapil (2022a). A review on implementation of 5S for workplace management. *Journal of Applied Research on Industrial Engineering*, 9(3), pp. 323-330.

Gupta, M. (2022b). Critical Success Factors for 5S Implementation in Industrial Environments. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 15(3), 123-140.

Hirano, Hiroyuki (1995). *5S for Operators: 5 Pillars of the Visual Workplace.* Productivity Press.

Hossain, M. (2015). Review of literature in open innovation in small and medium enterprises. *Journal of Global Entrepreneurship Research*, 5(6).

Morrar, R. (2014). Innovation in services. *Technology Innovation Management Review*, 4(4), 6-14

Omogbai, O., Salonitis K. (2017). The implementation of 5S lean tool using system dynamics approach. *Procedia CIRP*, 60, 380-385.

Osada, T. (1993). *Les 5S, première pratique de la qualité totale.* Dunod, Paris.

Sati S.A., Adam A.I. (2019) *Evaluating the Effectiveness of 5S Implementation in the Industrial Sector.* International Journal of Innovative Science and Research Technology (IJISRT), 4(10), 804-808.

Sati, N., Sharma, R., Patel, S. (2019). Challenges in Implementing 5S in Manufacturing Industry. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, 5(2), 13-18.

Tidd, J. (2006). A review of innovation models. *Imperial College London, Science and Technology Policy Research Unit.*

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Staffing for service systems with blended workforce

KAIYUE YANG[1], BENJAMIN LEGROS[2], OUALID JOUINI[1]

[1] Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, Laboratoire Génie Industriel
91190 Gif-sur-Yvette, France
kaiyue.yang@centralesupelec.fr
oualid.jouini@centralesupelec.fr

[2] SKEMA Business School
92156 CEDEX Suresnes, France
benjamin.legros@skema.edu

***Résumé* – Cette étude examine comment une entreprise employant à la fois des agents permanents et flexibles peut optimiser ses stratégies de dimensionnement. Le système est modélisé sous la forme d'une file d'attente hybride, combinant une file d'attente à double entrée et un modèle M/M/N. Les clients (agents flexibles) choisissent stratégiquement d'entrer ou non dans le système en fonction des coûts d'attente et des prix (récompenses). Les prix et récompenses sont considérés comme des paramètres exogènes. L'objectif de l'entreprise est de maximiser son revenu en déterminant le nombre optimal d'agents permanents ainsi que le niveau de priorité optimal entre les deux types d'agents. Nous calculons tout d'abord les probabilités stationnaires du système. Ensuite nous calculons les premier et deuxième moments des temps d'attente des clients, des agents flexibles et des agents permanents, en montrant que les temps d'attente moyens des clients et des agents flexibles varient de manière monotone avec leurs taux d'arrivée. Pour déterminer la politique optimale de l'entreprise, nous analysons le comportement à l'équilibre des clients et des agents flexibles. Nos résultats montrent que le revenu est unimodal par rapport au nombre d'agents permanents et au niveau de priorité. Enfin, nous optimisons simultanément le nombre d'agents permanents et leurs niveaux de priorité pour maximiser le revenu de la plateforme et étudions l'influence des salaires et du taux de service sur le problème d'optimisation.**

***Abstract* – This study investigates how a company that employs both permanent and flexible agents can optimize its staffing strategies. The system is modeled as a blended queue, which is a combination of a double-ended queue and an M/M/N model. Customers (flexible agents) strategically choose whether to join the system considering wait costs and prices (rewards), with price and reward treated as exogenous parameters. The company's objective is to maximize the revenue to determine the optimal number of permanent agents and optimal order priority between both types of agents. We employ matrix-geometric methods to derive system stationary probabilities. Additionally, we calculate the first and second moments of waiting times for customers, flexible agents, and permanent agents, demonstrating that the expected waiting times for customers and flexible agents change monotonically with their arrival rates. To determine the optimal policy for the firm, we examine the equilibrium behaviour of customers and flexible agents. Our findings indicate the revenue is unimodal in terms of the number of permanent agents and priority level. Additionally, we optimize both the number of permanent agents and their priority levels to maximize platform revenue, and examine the influence of wage and service rate on the optimization problem.**

***Mots clés* – File d'attente à double entrée, personnel flexible, théorie des jeux, dimensionnement.**
***Keywords* – Double-ended queue, flexible workforce, game theory, staffing.**

1 INTRODUCTION AND LITERATURE REVIEW

Labor staffing is a critical challenge for companies, particularly when facing variable demand. Gig platforms offer a convenient solution to address labor shortages during peak periods. For example, Amazon uses Amazon Flex to recruit additional drivers for last-mile delivery [Amazon Flex, 2025]. In our study, we refer to agents recruited through gig platforms as *flexible agents* and those directly employed by the company as *permanent agents*. This blended workforce approach enables companies to manage fluctuating demand more efficiently while reducing overall labor expenses.

Determining the optimal number of agents is crucial when employing contractors, as the variability of flexible agents introduces uncertainty into the system. [Gurvich et al., 2019] explore capacity management for contractors who self-schedule, examining the impact of controls such as pool size, retail price, and agent thresholds within a newsvendor framework. Similarly, [Ibrahim et al., 2018] investigate the influence of customer abandonment on optimal staffing and propose delay announcements to control abandonment behavior. However, these studies assume a fixed number of flexible agents and focus on management tools to ensure sufficient capacity in contractor-only scenarios. In contrast, we treat flexible agents as an independent arrival process and focus on the matching process. We introduce a double-ended queue

model to capture the stochastic dynamics in a blended workforce setting.

The double-ended queue was originally proposed by [Kendall, 1951] in the background of taxi-passenger scenarios. This queueing model considers customer arrivals and server arrivals as independent processes, making it applicable to a range of applications, such as catastrophes and repairs [Di Crescenzo et al., 2012], and live organ allocation [Elalouf et al., 2018]. The strategic behavior was also examined by scholars. The related study can be dated back to the celebrated Naor Model which is used to analyze strategic customer behavior [Naor, 1969]. Then [Shi et Lian, 2016] extended the analysis to consider strategic actions on both sides by constructing a passenger-taxi queueing system in an observable setting.

However, these studies primarily examine the matching process with one type of agents. In contrast, our work develops a queueing model for a blended workforce, which is a combination of a double-ended queue and an M/M/N model. [Dong et Ibrahim, 2020] also consider a blended workforce and determine the optimal staffing to maximize profit to balance the cost of the operation and examine the influence of uncertainty and blended workers on service quality. They analyze three different distribution models and use a specific form of variance to describe the random number of servers. In this paper, we consider the rational behavior of participants and construct their utility function by waiting time sensitivity. Moreover, while [Dong et Ibrahim, 2020] assume a fixed pool size of flexible workers, we consider an infinite market of flexible workers. [Lobel et al., 2024] further consider the demand that is not only stochastic but also changes over time and compare the optimal decisions and revenue across three workforce models: exclusively flexible, exclusively permanent, and a blended workforce. However, their analysis overlooks strategic customer behavior and does not account for how sensitive flexible agents are to waiting times.

In this study, we assume that both customers and flexible agents behave strategically, making decisions based on exogenous prices (i.e., rewards for flexible agents) and waiting costs. This paper extends previous work in [Kaiyue et al., 2024]. Instead of determining the optimal pricing strategy, we specifically focus on the optimal staffing and allocation problems. Additionally, we calculate the first and second moments of waiting time and analyze how key parameters—such as arrival rates, the number of permanent agents, and service rates—influence the system performance.

2 MODEL DESCRIPTION

Consider a firm employing N permanent agents who work full-time for a wage of w per time unit. Each permanent agent becomes immediately available after completing a service, with service times following an exponential distribution with rate θ. In addition, the firm supplements its workforce by recruiting flexible agents via a gig platform. Unlike permanent agents, a flexible agent leaves the system after completing a service. Both types of agents have the same processing speeds, but they differ in their working flexibility and unit operating costs.

We consider a market where customers are sensitive to both price and waiting time. The market of customers is modeled as a Poisson arrival process with rate Λ. As in [Naor, 1969], we define the utility function of customers by $U_c = R - p - ct$, where t denotes the waiting time experienced by customers, R is the reward when receiving service, p is the price and c is the waiting cost per unit time. Assume customers cannot observe the system state and are risk-neutral, so they make their joining decision based on their expected net revenue. The utility function can be then defined as $U_c = R - p - cE(W_c)$.

The market of flexible agents is represented by a Poisson arrival process with rate M. Flexible agents decide whether to join or not based on the utility function defined as $U_f = r - dE(W_f)$, where r is the reward when offering the service and d denotes the per unit waiting cost. Given that the utility of balking is zero, the arrival rate of customers λ (flexible agents μ) is the solution in λ (μ) of $U_c = 0$ ($U_f = 0$).

The demand allocation between permanent agents and flexible agents is governed by a randomizing parameter α. When both agent types are available, a waiting customer is assigned to a permanent agent with probability α and to a flexible agent with probability $1 - \alpha$. If only one type is available, the customer is matched to that agent directly.

The objective function of this system is to determine the optimal number of permanent agents, N, and the priority parameter, α, such that the revenue, say Π, and given by

$$\Pi = \lambda p - wN - r\mu,$$

is maximized.

Next, we compute the performance measures of this blended queue. Firstly, we formulate the Markov chain to describe the stochastic process. Given that the queue of customers and the queue of agents (flexible agents and permanent agents) do not coexist, we represent the system using a two-dimensional Markov chain. We denote (i, j) as the state of the system where i is the number of available permanent agents, $i = 0,1,2, \cdots, N$, and j represents the number of flexible agents waiting for $j \geq 0$ and the number of customers waiting in their queue for $j \leq 0$. The transition rate from state (i, j) to state (i', j'), denoted by $r_{(i,j),(i\prime,j\prime)}$, is defined as

$$r_{(i,j),(i\prime,j\prime)} = \begin{cases} \lambda & \text{if } (i',j') = (i-1,j) \text{ for } i > 0, j = 0, \\ \lambda & \text{if } (i',j') = (i,j-1) \text{ for } i = 0, \\ \alpha\lambda & \text{if } (i',j') = (i-1,j) \text{ for } i > 0, j > 0, \\ (1-\alpha)\lambda & \text{if } (i',j') = (i,j-1) \text{ for } i > 0, j > 0, \\ \mu & \text{if } (i',j') = (i,j+1) \text{ for } i \geq 0, j \geq 0, \\ (N-i)\theta & \text{if } (i',j') = (i+1,j) \text{ for } i \geq 0, j \geq 0, \\ \mu + N\theta & \text{if } (i',j') = (i,j+1) \text{ for } i = 0, j < 0, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

Let $\pi_{i,j}$ denote the probability that the system is in state (i, j). For $i = 0$ and $j \leq 0$, the balance equation for $\pi_{i,j}$ is given by

$$\lambda\pi_{0,j} = (\mu + N\theta)\pi_{0,j-1}, \text{ for } j \leq 0.$$

Consequently, we deduce that

$$\pi_{0,-j} = \left(\frac{\lambda}{\mu + N\theta}\right)^j \pi_{0,0}, \text{ for } j \geq 0.$$

This expression shows that customers' queue is stable under the condition $\lambda < \mu + N\theta$. When $j \geq 0$, we use the Matrix Geometric method developed by [Neuts, 1994]. This method applies here because the Markov chain has a block-tridiagonal structure. In Theorem 1, we give the stability condition of the Markov chain.

Theorem 1 (Stability Condition). The stability condition is given by

$$\lambda - N\theta < \mu < \lambda\left[1 - \alpha\left(1 - B_N\left(\frac{\alpha\lambda}{\theta}\right)\right)\right],$$

where $B_s(a) := \frac{\frac{a^s}{s!}}{\sum_{k=0}^{s}\frac{a^k}{k!}}$ is the blocking probability in the corresponding $M/M/s/s$ queue, also called the Erlang-B formula.

For $j \geq 0$, to compute the stationary probabilities, we can determine numerically the geometric relation between the two vectors $(\pi_{0,j}, \pi_{1,j}, \cdots, \pi_{N,j})$ and $(\pi_{0,j+1}, \pi_{1,j+1}, \cdots, \pi_{N,j+1})$. Therefore, we can compute all vectors as a function of the initial one $(\pi_{0,0}, \pi_{1,0}, \cdots, \pi_{N,0})$. Using the N balance equations that relate the probabilities $\pi_{0,0}, \pi_{1,0}, \cdots, \pi_{N,0}$, in addition to the normalizing condition, we obtain a set of $N+1$ linear equations that allow us to compute $\pi_{0,0}, \pi_{1,0}, \cdots, \pi_{N,0}$ and deduce the other stationary probabilities.

3 MOMENTS OF WAITING TIME

In this section, we mainly focus on deriving the first and second moments of waiting time for customers, flexible agents and permanent agents. To derive these moments, begin by examining the conditional waiting time experienced by a new customer or agent upon arrival.

For a customer arriving and observing the system at state $(0, -j)$, the conditional waiting time is given by the sum of $i+1$ independent exponential random variables, each with rate $\mu + N\theta$. In contrast, if the system is observed in state (i, j), the customer does not have to wait. Therefore, the first and second moments of waiting time for customers as shown in Theorem 2.

Theorem 2. (Customer Waiting Time) The expected waiting time for customers is

$$E(W_c) = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{j+1}{\mu + N\theta} \pi_{0,-j} = \frac{(\mu + N\theta)\,\pi_{0,0}}{(\lambda - \mu - N\theta)^2},$$

and its second moment is

$$E(W_c^2) = \sum_{j=0}^{\infty} \left[\frac{j+1}{(\mu + N\theta)^2} + \left(\frac{j+1}{\mu + N\theta} \right)^2 \right] \pi_{0,-j} = \frac{2(\mu + N\theta)\,\pi_{0,0}}{(\mu + N\theta - \lambda)^3}.$$

A new arrival flexible agent's conditional waiting time depends on the priority level. First, when $\alpha = 0$ (i.e., when flexible agents are given priority), a flexible agent arriving in a system at state (i, j) waits for a duration equal to the sum of $j+1$ independent exponential random variables with rate λ.

When $\alpha = 1$, a new arrival flexible agent service matching may be overtaken by permanent agents. Therefore, we first focus on the remaining waiting time for the first flexible agent in line. This can be modeled as a one-dimensional Markov process with a single absorbing state, representing the departure of the first flexible agent in line. This single absorbing state is because the flexible agents only can be matched when the queue of permanent agents is empty. We introduce $N+1$ unknown variables to represent the absorption time for each initial state and applying a first step analysis [Pinsky, 2010], we derive a system of $N+1$ linear equations. Solving these equations yields an analytical expression for the absorption time.

Assume a flexible agent enters the system in state (i, j), for the first flexible agent in line, the absorption time depends on the initial state i. Once this agent departs, the system resets to an initial state 0, so the absorption time for every subsequent flexible agent is identical. The result is summarized in Theorem 3.

Theorem 3. (Flexible Agent Waiting Time for $\alpha = 0$ and $\alpha = 1$). Consider $\alpha = 0$. Let $P_1(j) = \sum_{i=0}^{N} \pi_{i,j}$ denotes the probability that there are j flexible agents in the queue. The first moment and second moments are given by

$$E(W_f) = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{j+1}{\lambda} P_1(j),$$

$$E(W_f^2) = \sum_{j=0}^{\infty} \left[\frac{j+1}{\lambda^2} + \left(\frac{j+1}{\lambda} \right)^2 \right] P_1(j).$$

Consider $\alpha = 1$. The first and second moments of waiting time for flexible agents are given by

$$E(W_f) = \sum_{i=0}^{N} \sum_{j=0}^{\infty} \left(\sum_{k=0}^{i} E\left(\tau_k^{(1)}\right) + j\, E\left(\tau_0^{(1)}\right) \right) \pi_{i,j},$$

$$E(W_f^2) = \sum_{i=0}^{N} \sum_{j=0}^{\infty} \left[\sum_{k=0}^{i} \mathrm{V}\left(\tau_k^{(1)}\right) + j\, \mathrm{V}\left(\tau_0^{(1)}\right) + \left(\sum_{k=0}^{i} E\left(\tau_k^{(1)}\right) + j\, E\left(\tau_0^{(1)}\right) \right)^2 \right] \pi_{i,j},$$

where $V\left(\tau_i^{(1)}\right) = E\left[\left(\tau_i^{(1)}\right)^2\right] - \left[E\left(\tau_i^{(1)}\right)\right]^2$. Here, the k th moment of $\tau_i^{(1)}$ is defined by

$$E\left[\left(\tau_i^{(1)}\right)^k\right] = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=i}^{N-1} T^{(1)}(j,k) \prod_{m=i}^{j-1} \frac{(N-m)\theta}{\lambda} + \prod_{m=i}^{N-1} \frac{(N-m)\theta}{\lambda} E\left[\left(\tau_N^{(1)}\right)^k\right],$$

with

$$\lambda E\left[\left(\tau_N^{(1)}\right)^k\right] = k\left[\left(\tau_N^{(1)}\right)^{k-1}\right], T^{(1)}(i,1) = 1 \quad \text{and} \quad T^{(1)}(i,2) = 2(N-i)\theta\, E\left(\tau_{i+1}^{(1)}\right) E\left(\tau_i^{(1)}\right) + 2E\left(\tau_i^{(1)}\right).$$

For $\alpha \in (0,1)$, a flexible agent's service matching may be overtaken by a permanent agent with probability α. Following a similar approach as for the case with $\alpha = 1$, we first examine the remaining waiting time for the first flexible agent in line.

Unlike the $\alpha = 1$ scenario, which involves a single absorbing state, here the process is modeled as a one-dimensional Markov chain with $N+1$ absorbing states. Each state represents a potential departure point for the first flexible agent in line, so we must determine the probability that the first flexible agent in line departs from each state.

To address this, we introduce $(N+1) \times (N+1)$ unknown variables to denote the absorption probability from initial state to each departure state, and $N+1$ variables for the absorption time. Using a first step analysis, we derive analytical expressions for both the absorption probabilities and the absorption times.

By summing the waiting times for the first flexible agent in line, we can express the waiting time for a newly arriving flexible agent. Note that this waiting time depends on both the absorption probabilities and the absorption times. These results are summarized in the Theorem 4, where we first present the explicit solutions for the absorption probabilities and absorption times.

For each state $i = 0,1,\ldots,N$, we define $q_i^{(2)} = \left(q_{i,0}^{(2)}, q_{i,1}^{(2)}, \ldots, q_{i,N}^{(2)}\right)$ as the vector of absorption probabilities, and let $q^{(2)}$ be the corresponding $(N+1) \times (N+1)$ matrix (with $(q^{(2)})^{n-1}$ its $(n-1)$th power) and $\tau_i^{(2)}$ as the absorption time from state i.

The explicit expressions for $q^{(2)}$ are given by

$$q_{i,k}^{(2)} = (C^{-1})_{ik}\, \beta_k, \quad i,k = 0,1,\ldots,N,$$

with

$$\beta_0 = \frac{\lambda}{\lambda + N\theta}, \quad \beta_k = \frac{(1-\alpha)\lambda}{\lambda + (N-k)\theta}\ (0 < k < N), \quad \beta_N = 1 - \alpha,$$

and

$$C = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{N\theta}{\lambda+N\theta} & 0 & \cdots & 0 \\ -\frac{\alpha\lambda}{\lambda+(N-1)\theta} & 1 & -\frac{(N-1)\theta}{\lambda+(N-1)\theta} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & -\alpha & 1 \end{bmatrix}.$$

The inverse C^{-1} is given by Usmani's formula [Usmani, 1994]. Additionally, the first and second moments of $\tau_i^{(2)}$ are given by $E(\tau_i^{(2)}) = \sum_{j=0}^{N}(C^{-1})_{ij}\,(d_2)_j, E\left[(\tau_i^{(2)})^2\right] = \sum_{j=0}^{N}(C^{-1})_{ij}\,(d_3)_j, \quad i = 0,1,\dots,N,$

where $d_2 = (E[B_0], E[B_1], \dots, E[B_N])^T$, and $d_3 = (d_{3,0}, d_{3,1}, \dots, d_{3,N})^T$, with

$$d_{3,0} = E[B_0^2] + 2(1-\beta_0)E(B_0)E(\tau_1^{(2)})$$

$$d_{3,i} = E[B_i^2] + 2\gamma_i E(B_i)E(\tau_{i-1}^{(2)}) + 2(1-\gamma_i-\beta_i)E(B_i)E(\tau_{i+1}^{(2)}), i = 1,\dots,N-1,$$

$$d_{3,N} = E[B_N^2] + 2\gamma_N E(B_N)E(\tau_{N-1}^{(2)}).$$

As for the moments of B_i, they are given by

$$E(B_i) = \frac{1}{\lambda+(N-i)\theta}, \quad E(B_i^2) = \frac{2}{(\lambda+(N-i)\theta)^2},$$

where the parameters γ_i are defined as

$$\gamma_i = \frac{\alpha\lambda}{\lambda+(N-i)\theta}, \quad 0 < i < N, \qquad \gamma_N = \alpha.$$

Theorem 4. (Flexible Agent Waiting Time for $\alpha \in (0,1)$). Under the notation above, the expected waiting time of flexible agents is given by

$$E(W_f) = \sum_{i=0}^{N}\sum_{j=0}^{\infty}\left[E(\tau_i^{(2)}) + \sum_{n=1}^{j}\sum_{m=0}^{N}\left[q_i^{(2)}(q^{(2)})^{n-1}\right]_m E(\tau_m^{(2)})\right]\pi_{i,j},$$

and the second moment by

$$E(W_f^2) = \sum_{i=0}^{N}\sum_{j=0}^{\infty}\left\{V(\tau_i^{(2)}) + \sum_{n=1}^{j}\sum_{m=0}^{N}\left[q_i^{(2)}(q^{(2)})^{n-1}\right]_m V(\tau_m^{(2)}) + \left(E(\tau_i^{(2)}) + \sum_{n=1}^{j}\sum_{m=0}^{N}\left[q_i^{(2)}(q^{(2)})^{n-1}\right]_m E(\tau_m^{(2)})\right)^2\right\}\pi_{i,j},$$

where $V(\tau_i^{(2)}) = E\left[(\tau_i^{(2)})^2\right] - \left[E(\tau_i^{(2)})\right]^2$.

The conditional waiting time of permanent agents follows a similar pattern to that for flexible agents. When $\alpha = 1$, the waiting time for a new arrival permanent agent in state (i,j) is the convolution of $j+1$ independent exponential distributions with rate λ. When $\alpha = 0$, the waiting time of the first permanent agent in line is modeled by a Markov chain with a single absorbing state. The key difference from the flexible agent analysis is that here the underlying Markov chain is infinite, so we introduce an infinite number of variables related to the absorption time.

Furthermore, since there are N permanent agents in the system, we must consider the probability of entering the system to compute the waiting time. This probability is given by $p_e = \sum_{i=0}^{N}(N-i)\sum_{j=0}^{\infty}p_{i,j} + \sum_{n=1}^{\infty}N\,p_n = N - E(Q_p)$, where $E(Q_p) = \sum_{i=0}^{N} i\sum_{j=0}^{\infty}p_{i,j}$.

Theorem 5. (Permanent Agent Waiting Time for $\alpha = 0$ and $\alpha = 1$). When $\alpha = 0$, the expected waiting time for permanent agents is

$$E(W_p) = \frac{1}{N-E(Q_p)}\sum_{i=0}^{N}\sum_{j=0}^{\infty}\left[(N-i)(i+j+1)\,E(\tau^{(3)})\right]\pi_{i,j},$$

and its second moment is

$$E(W_p^2) = \frac{1}{N-E(Q_p)}\sum_{i=0}^{N}\sum_{j=0}^{\infty}(N-i)\left[(i+j+1)V(\tau^{(3)}) + \left((i+j+1)\,E(\tau^{(3)})\right)^2\right]\pi_{i,j},$$

where $V(\tau^{(3)}) = E\left[(\tau^{(3)})^2\right] - \left[E(\tau^{(3)})\right]^2$, $E(\tau^{(3)}) = \frac{1}{\lambda-\mu}$ and $E\left[(\tau^{(4)})^2\right] = \frac{2\lambda}{(\lambda-\mu)^3}$.

When $\alpha = 1$, the first and the second moments are given by

$$E(W_p) = \sum_{i=0}^{N}\frac{i+1}{\lambda}\frac{(N-i)}{N-E(Q_p)}P_2(i),$$

$$E(W_p^2) = \sum_{i=0}^{N}\left[\frac{i+1}{\lambda^2} + \left(\frac{i+1}{\lambda}\right)^2\right]\frac{(N-i)}{N-E(Q_p)}P_2(i),$$

where $P_2(i) = \sum_{j=0}^{\infty}\pi_{i,j}$.

When $\alpha \in (0,1)$, we formulate a Markov process with infinitely many absorbing states to calculate the absorption probability and absorption time. In particular, the absorption probability matrix, denoted by $q^{(4)}$, is defined by

$$q_{j,k}^{(4)} = \begin{cases} q_{k,k}^{(4)}\prod_{i=1}^{k-j}M_{k-i}, & j < k, \\ q_{k,k}^{(4)}\,Y^{\,j-k}, & j > k, \end{cases}$$

with the boundary conditions

$$q_{j,0}^{(4)} = q_{0,0}^{(4)}\,Y^j, \quad j \geq 0, \quad q_{0,0}^{(4)} = \frac{\beta_0}{1-(1-\beta_0)Y},$$

and where the coefficients satisfy

$$M_0 = 1-\beta_0, \quad M_j = \frac{1-\beta_1-\gamma}{1-\gamma M_{j-1}}, \quad q_{k,k}^{(4)} = \frac{\beta_1}{1-\gamma M_{k-1}-(1-\beta_1-\gamma)Y},$$

with

$$Y = \frac{\lambda+\mu}{2\mu}\left(1-\frac{\sqrt{4\alpha\lambda\mu+\lambda^2-2\lambda\mu+\mu^2}}{\lambda+\mu}\right), \beta_0 = \frac{\lambda}{\lambda+\mu}, \beta_1 = \frac{\alpha\lambda}{\lambda+\mu}, \gamma = \frac{(1-\alpha)\lambda}{\lambda+\mu}.$$

The mean absorption times are given by

$$\tau_j^{(4)} = A_1 + C_1\,Y^j, \quad j > 0, \quad A_1 = \frac{1}{\alpha\lambda}, \quad C_1 = \frac{b-\beta_0 A_1}{1-(1-\beta_0)Y}, \quad b = \frac{1}{\lambda+\mu}.$$

Their second moments are

$$E\left[(\tau_j^{(4)})^2\right] = A_2 + B_2\,j\,Y^j + C_2\,Y^j,$$

with

$$A_2 = \frac{b_2}{\beta_1} + \frac{2b}{\alpha\lambda}\left(\frac{1}{\beta_1}-1\right), \quad B_2 = \frac{2bC_1\,Y}{2\gamma-\mathrm{Y}}, \quad C_2 = \frac{b_2+(1-\beta_0)(A_2+B_2Y)+2(1-\beta_0)b\left(\frac{1}{\alpha\lambda}+C_1Y\right)-A_2}{1-(1-\beta_0)Y}$$

and $b_2 = \frac{2}{(\lambda+\mu)^2}$.

Theorem 6. (Permanent Agent Waiting Time for $\alpha \in (0,1)$).

Under the notation above, the expected waiting time for permanent agents is given by

$$E(W_p) = \frac{1}{N - E(Q_p)} \sum_{i=0}^{N} (N-i) \sum_{j=0}^{\infty} \left(E(\tau_j^{(4)}) + \sum_{n=1}^{i} \sum_{k=0}^{\infty} \left[q_j^{(4)} \left(q^{(4)}\right)^{n-1} \right]_k E(\tau_k^{(4)}) \right) \pi_{i,j},$$

and the second moment by

$$E(W_p^2) = \frac{1}{N - E(Q_p)} \sum_{i=0}^{N} (N - i) \sum_{j=0}^{\infty} \left(V(\tau_j^{(4)}) + \sum_{n=1}^{i} \sum_{k=0}^{\infty} \left[q_j^{(4)} \left(q^{(4)}\right)^{n-1} \right]_k V(\tau_k^{(4)}) + \left(E(\tau_j^{(4)}) + \sum_{n=1}^{i} \sum_{k=0}^{\infty} \left[q_j^{(4)} \left(q^{(4)}\right)^{n-1} \right]_k E(\tau_k^{(4)}) \right)^2 \right) \pi_{i,j},$$

Where $V(\tau_i^{(4)}) = E\left[\left(\tau_i^{(4)}\right)^2 \right] - \left[E(\tau_i^{(4)}) \right]^2$.

Next, we investigate the monotonicity of the expected waiting times for customers and flexible agents with respect to their arrival rates. Using a sample path approach, we couple two stochastic processes—identical in all parameters except for the one under comparison—and analyze the corresponding numbers of customers and flexible agents in the system. By applying the distribution law, we deduce the monotonic behavior of the expected waiting times. The results are presented in Theorem 7.

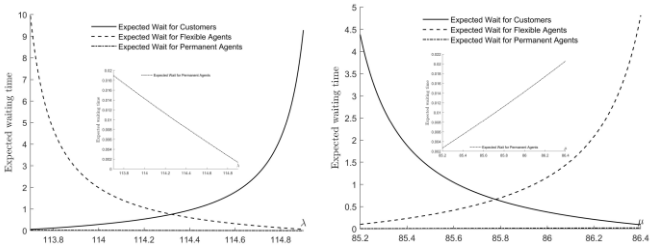
Theorem 7 (First-order Monotonicity Properties). The expected waiting time of customers $E(W_c)$ (flexible agents $E(W_f)$) is increasing (decreasing) in λ and decreasing (increasing) in μ.

In Figure 1 and Figure 2, we analyze how the customer arrival rate, the flexible agent arrival rate, the number of permanent agents, and the priority level affect the first and second moments of the waiting times for customers, flexible agents, and permanent agents.

Our results show that λ and μ exhibit symmetrical influence on expected wait and second moment of wait for customers, flexible and permanent agents. An increase in the customer arrival rate, λ, results in higher first and second moments of customer waiting times, while both measures decline for flexible and permanent agents, and vice versa for μ.

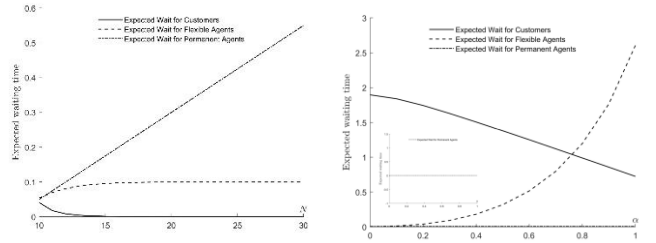
Additionally, an increase in the number of permanent agents, N has a dual effect. With more permanent agents available, customer expected waiting time decreases. However, the expected waiting time for both flexible and permanent agents tends to increase because of a higher competition among service providers. Notably, the effect on the variability (second moment) of waiting times mirrors that on expected waiting times.

As α increases, the platform allocates more customer demand to permanent agents. This reallocation naturally raises the waiting time for flexible agents since fewer tasks are assigned to them. In contrast, it is interesting to observe that customers experience reduced waiting times because permanent agents who complete their tasks and promptly return to the system ensure a higher level of available labor. Furthermore, Figure 1 (d) and Figure 2 (d) illustrate giving more priority to permanent agents does not alter their expected wait but still can reduce the variability of their waiting times.



(a) (b)

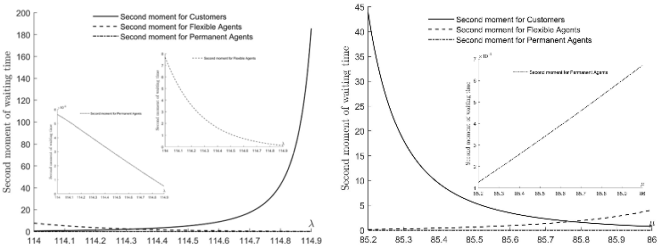
(a) $E(W_c)$, $E(W_f)$ and $E(W_p)$ as functions of λ ($N = 3$, $\alpha = 0.5$, $\mu = 100$)
(b) $E(W_c)$, $E(W_f)$ and $E(W_p)$ as functions of μ ($N = 3$, $\alpha = 0.5$, $\lambda = 100$)



(c) (d)

(c) $E(W_c)$, $E(W_f)$ and $E(W_p)$ as functions of N ($\alpha = 0.5$, $\lambda = 100$, $\mu = 60$)
(d) $E(W_c)$, $E(W_f)$ and $E(W_p)$ as functions of α ($N = 3$, $\lambda = 100$, $\mu = 85.5$)

Figure 1. $E(W_c)$, $E(W_f)$ and $E(W_p)$ as functions of λ, μ, N and α ($\theta = 5$)



(a) (b)

(c) (d)

Figure 2. $\mathbb{E}(W_c^2)$, $\mathbb{E}(W_f^2)$ and $\mathbb{E}(W_p^2)$ as functions of λ, μ, N and α (using the same parameters as in Figure 1.)

4 MAXIMIZING REVENUE IN THE BLENDED MODEL

In this section, we aim to maximize revenue in the blended model. To begin, we obtain the equilibrium joining behavior of customers and flexible agents, as presented in Theorem 8.

Theorem 8 (Equilibrium Joining Policy). The equilibrium arrival rates λ and μ are determined by the following four alternatives:

Case 1: Full/Full. If $U_c(\Lambda, M) \geq 0$ and $U_f(\Lambda, M) \geq 0$, then $\lambda = \Lambda$ and $\mu = M$.

Case 2: Full/Partial. If $U_c(\Lambda, M) \geq 0$ and $U_f(\Lambda, M) < 0$, then there exists a unique solution in μ to $U_f(\Lambda, \mu) = 0$. If for this solution we have $U_c(\Lambda, \mu) \geq 0$, then $\lambda = \Lambda$ and μ is the unique solution to $U_f(\Lambda, \mu) = 0$. Otherwise, if $U_c(\Lambda, \mu) < 0$, then Case 4 provides the equilibrium arrival rates.

Case 3: Partial/Full. If $U_c(\Lambda, M) < 0$ and $U_f(\Lambda, M) \geq 0$, then there exists a unique solution in λ to $U_c(\lambda, M) = 0$. If for this solution we have $U_f(\lambda, M) \geq 0$, then $\mu = M$ and λ is the unique solution to $U_c(\lambda, M) = 0$. Otherwise, if $U_f(\lambda, M) < 0$, then Case 4 provides the equilibrium arrival rates.

Case 4: Partial/Partial. In the remaining cases, λ and μ are given by the unique solution to $U_c(\lambda, \mu) = U_f(\lambda, \mu) = 0$.

The existence of equilibrium joining strategy is guaranteed by the boundary limits of the stability condition as specified in Theorem 1. The uniqueness of the solution is ensured by the monotonicity of the expected waiting time of customers and flexible agents with respected to λ and μ as shown in Theorem 7.

Solving $U_c(\lambda, \mu) = 0$ or $U_f(\lambda, \mu) = 0$, as described in Cases 2 and 3, can be efficiently computed using the bisection method. To solve for the equilibrium behavior $U_c(\lambda, \mu) = U_f(\lambda, \mu) = 0$ in Case 4, we can first determine the value that makes the customer utility function $U_c(\lambda, \mu)$ equal to zero. This value is then substituted into the flexible agents' utility function $U_f(\lambda, \mu)$ to find the corresponding μ that satisfies $U_f(\lambda, \mu) = 0$. Next, we update the customer's utility with this new μ and repeat the process. By iterating in this manner, the solution converges to the equilibrium.

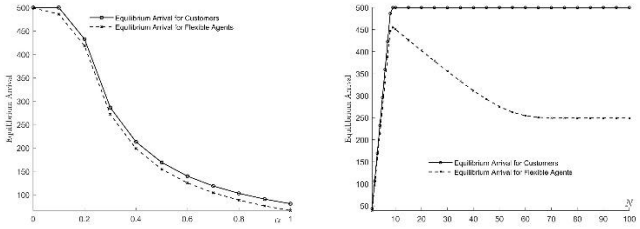
Impact of α and N on demand and revenue.

We now examine how the priority parameter α and the number of permanent agents N affect demand and revenue, as shown in Figure 3 and Figure 4. As α increases—indicating greater priority given to permanent agents—the joining behavior of flexible agents declines. When the priority is low, the full customer market is captured; however, assigning too much priority to permanent agents reduces the presence of flexible agents, which in turn increases customer waiting times and deters customer participation.

Figure 3 (b) illustrates the impact of N on demand. Initially, as N increases, customer waiting times decrease, encouraging more customers to join the system. Simultaneously, the improved service request attracts flexible agents. However, once the customer market is fully captured, further increases in N intensify the competition between permanent and flexible agents. This heightened competition elevates waiting times for flexible agents, ultimately leading to a reduction in their joining rate.

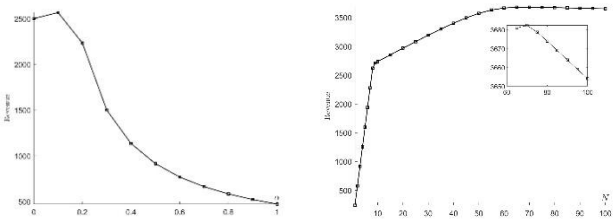
Figure 4 (a) demonstrates that revenue exhibits an unimodal relationship with α. When the entire customer market is captured, increasing α leads to a reduction in the participation of flexible agents, which in turn lowers labor costs and boosts revenue. However, under partial market coverage, a higher α diminishes the presence of flexible agents, degrading service quality for customers and ultimately reducing revenue.

Figure 4 (b) illustrates that revenue exhibits an unimodal behavior as a function of N. Initially, when market coverage is partial, adding permanent agents increases customer demand and attracts more flexible agents, with the growth in demand offsetting rising service costs and boosting revenue. Once full market coverage is achieved, increasing N initially benefits revenue further by deterring flexible agents arrival rate. However, beyond a certain threshold, additional permanent agents only add costs without significantly reducing the flexible agents' arrival rate, ultimately causing revenue to decline.



(a) Arrival rate vs. α ($N = 3, \Lambda = 500, M > 500$) (b) Arrival rate vs. N ($\alpha = 0.5, \Lambda = 500, M > 500$)

Figure 3. Equilibrium arrival rate as a function of α and N. ($\theta = 5, R = 15, c = 5, d = 4, p = 10, r = 5, w = 1$).



(a) Revenue as a function of α (b) Revenue as a function of N

Figure 4. The impact of α and N on revenue (using the same parameters as in Figure 3.)

Impact of w and θ.

Table 1 details how changes in the wage w and service rate θ influence the optimal parameters α^*, optimal staffing N^* and revenue. The analysis shows that as the wage increases, fewer permanent agents are employed (with at least one, necessary for stability) since their cost rises relative to flexible agents, which confirms the intuition. When hiring more than one permanent agent, the system typically allocates full priority ($\alpha = 1$) to them and reduces flexible agents' appeal by assigning a lower priority. Likewise, a higher service rate mimics the effect of a wage reduction by boosting capacity.

Table 1. Impact of w and θ on the α^*, N^* and Π_2^* ($R = 15$, $c = 5, d = 4, p = 10, r = 5, \Lambda = 500, M > 500$)

		$\theta = 2$	$\theta = 4$	$\theta = 6$	$\theta = 8$	$\theta = 10$
w = 1	α^*	1	1	1	1	1
	N^*	269	143	99	78	65
	Π_2^*	4731.000	4857.000	4901.000	4922.000	4935.000
w = 10	α^*	0.005	1	1	1	1
	N^*	1	131	93	73	61
	Π_2^*	2497.649	3611.626	4024.490	4236.300	4365.814
w = 20	α^*	0.005	0.028	1	1	1
	N^*	1	1	82	66	56
	Π_2^*	2487.649	2497.641	3148.298	3540.676	3784.900
w = 30	α^*	0.005	0.028	0.068	1	1
	N^*	1	1	1	57	50
	Π_2^*	2477.649	2487.641	2497.636	2921.122	3254.775
w = 40	α^*	0.005	0.028	0.068	0.126	1
	N^*	1	1	1	1	42
	Π_2^*	2467.649	2477.641	2487.636	2497.633	2788.464

5 CONCLUSION

This study introduces a blended queueing model that combines a double-ended queue with an M/M/N system to support operations employing both permanent and flexible agents. We have computed the stationary probabilities of the system states using a matrix geometric method. We further computed the first and second moments of the waiting times for customers, flexible agents, and permanent agents. Using a sample path approach, we have proved that the expected waiting times for customers and flexible agents increase monotonically with their arrival rates, and we established both the existence and uniqueness of the equilibrium. Building on these results, we have optimized the number of permanent agents and their priority level. Our analysis indicates that higher wages reduce the optimal number of permanent agents to hire, while increasing priority on flexible agents to maximize platform revenue. Longer service times lead to the same effect.

Future research could extend the analysis by relaxing the fixed prices and rewards assumptions, thereby developing dynamic pricing strategies for both customers and flexible agents. Future studies might also consider incorporating customer preferences by distinguishing the benefits of being served by different types of agents. Additionally, examining the impact of market size uncertainty, rather than assuming a fixed market, would provide further valuable insights.

6 REFERENCES

Amazon Flex (2025). With amazon flex, you choose when and how you work. https://flex.amazon.com/blog/

2024/with-amazon-flex-you-choose-when-and-how-you-work. Accessed: Feb 17, 2025.

Gurvich, I., Lariviere, M., and Moreno, A. (2019). Operations in the on-demand economy: Staffing services with self-scheduling capacity. In Sharing economy, pages 249–278. Springer.

Ibrahim, R. (2018). Managing queueing systems where capacity is random and customers are impatient. *Production and Operations Management*, *27*(2), 234-250.

Kendall, D. G. (1951). Some problems in the theory of queues. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, *13*(2), 151-173.

Elalouf, A., Perlman, Y., & Yechiali, U. (2018). A double-ended queueing model for dynamic allocation of live organs based on a best-fit criterion. *Applied Mathematical Modelling*, *60*, 179-191.

Di Crescenzo, A., Giorno, V., Krishna Kumar, B., & Nobile, A. G. (2012). A double-ended queue with catastrophes and repairs, and a jump-diffusion approximation. *Methodology and Computing in Applied Probability*, *14*, 937-954.

Shi, Y., & Lian, Z. (2016). Equilibrium strategies and optimal control for a double-ended queue. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, *33*(03), 1650022.

Naor, P. (1969). The regulation of queue size by levying tolls. *Econometrica: journal of the Econometric Society*, 15-24.

Shi, Y., & Lian, Z. (2016). Equilibrium strategies and optimal control for a double-ended queue. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, *33*(03), 1650022.

Dong, J., & Ibrahim, R. (2020). Managing supply in the on-demand economy: Flexible workers, full-time employees, or both?. *Operations Research*, *68*(4), 1238-1264.

Lobel, I., Martin, S., & Song, H. (2024). Frontiers in operations: Employees vs. contractors: An operational perspective. *Manufacturing & Service Operations Management*, *26*(4), 1306-1322.

Yang, K., Legros, B., Jouini, O., (2024). Job pricing with online platforms. *La 25ème édition du congrès annuel de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision ROADEF 2024*.

Neuts, M. F. (1994). *Matrix-geometric solutions in stochastic models: an algorithmic approach*. Courier Corporation.

Usmani, R. A. (1994). Inversion of a tridiagonal Jacobi matrix. *Linear Algebra and its Applications*, *212*(213), 413-414.

Pinsky, M., & Karlin, S. (2010). *An introduction to stochastic modeling*. Academic press.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Advanced Artificial Intelligence Methods for Automated Defect Detection and Analysis in 3D-Printed Parts

Sara SAMINE[1], Maria ZEMZAMI[2], Nabil HMINA[1], Manuel LAGACHE[3], Soufiane BELHOUIDEG[4].

[1]Laboratory of Advanced Systems Engineering, National School of Applied Sciences ENSA, Ibn Tofail University Campus, Kenitra 14000, Morocco

sara.samine@uit.ac.ma , hmina@uit.ac.ma

[2]National Graduate School of Arts and Crafts, Mohamed V University, Rabat, Morocco

maria.zemzami@gmail.com

[3]Polytech Annecy Chambery, Univ. Savoie, SYMME F-74000 Annecy, France

manuel.lagache@univ-savoie.fr

[4]Research Laboratory in Physics and Sciences for Engineers (LRPSI), Polydisciplinary Faculty, Sultan Moulay Slimane University, Béni-Mellal, Morocco

soufianebelhouideg@usms.ma

Résumé – **L'impression 3D a révolutionné le domaine de la fabrication en permettant la création de composants complexes et personnalisables, avec des applications variées dans des secteurs tels que la santé, l'automobile et l'aérospatiale. Malgré ses avantages, l'apparition de défauts durant le processus d'impression, tels que des décalages de couches, de la porosité ou des irrégularités de surface, demeure un défi majeur. Ces défauts peuvent compromettre la qualité, la fonctionnalité et les performances mécaniques des pièces imprimées, soulignant la nécessité de mécanismes de contrôle qualité efficaces et fiables.**

Cette étude explore l'utilisation de l'intelligence artificielle (IA) pour répondre à ces défis en automatisant le processus de détection des défauts. L'approche repose sur l'analyse des données visuelles et structurelles des pièces imprimées en 3D afin d'identifier les anomalies susceptibles d'altérer leur qualité. Contrairement aux méthodes traditionnelles d'inspection, les solutions basées sur l'IA offrent des avantages tels que la scalabilité, l'analyse en temps réel et une adaptabilité aux conditions de fabrication complexes.

Les résultats démontrent le potentiel des systèmes de détection de défauts pilotés par l'IA pour améliorer la précision et la fiabilité du contrôle qualité en fabrication additive. Cette approche soutient également des objectifs plus larges, comme la réduction des déchets, l'optimisation des processus de production et la maintenance prédictive, ouvrant la voie à des flux de travail plus intelligents et plus efficaces.

Abstract **– 3D printing has revolutionized manufacturing by enabling the creation of complex and customizable components with applications in diverse fields such as healthcare, automotive, and aerospace. Despite its advantages, the occurrence of defects during the printing process, including layer misalignments, porosity, and surface inconsistencies, remains a significant challenge. These defects can compromise the quality, functionality, and mechanical performance of printed parts, highlighting the need for efficient and reliable quality control mechanisms.**

This study explores the use of artificial intelligence (AI) to address these challenges by automating the defect detection process. The approach focuses on analyzing visual and structural data of 3D-printed

components to identify anomalies that could impact their quality. Unlike traditional inspection methods, AI-based solutions provide the advantage of scalability, real-time analysis, and adaptability to complex manufacturing conditions.

The results demonstrate the potential of AI-driven defect detection to improve the precision and reliability of quality control in additive manufacturing. Furthermore, the proposed approach supports broader objectives, such as reducing material waste, optimizing production processes, and enabling predictive maintenance. By integrating advanced AI techniques, this research contributes to the development of smarter, more efficient manufacturing workflows, setting a benchmark for future advancements in the field of 3D printing.

***Mots clés*- Détection de Défauts, impression 3D, Intelligence Artificielle, Fabrication Additive.**

***Keywords* – Defect Detection, 3D Printing, ArtificialIntelligence, Additive Manufacturing.**

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Approche hybride en contrôle qualité : Intégration des cartes de contrôle et du machine learning au profit du secteur manufacturier

ASMA BEN BAHEM[1,2], CAMÉLIA DADOUCHI [1,2]

[1] LABORATOIRE EN INTELLIGENCE DES DONNEES DEPARTEMENT DE MATHEMATIQUES ET GENIE INDUSTRIEL, ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL, CP 6079, SUCCURSALE CENTRE-VILLE, MONTREAL, QUEBEC, CANADA

ASMA-2.BEN-BRAHEM@POLYMTL.CA , CAMELIA.DADOUCHI@POLYMTL.CA

[2]CENTRE INTERUNIVERSITAIRE DE RECHERCHE SUR LES RESEAUX D'ENTREPRISE, LA LOGISTIQUE ET LE TRANSPORT (CIRRELT)

***Résumé* – Dans le contexte concurrentiel de plus en plus exigeant, l'inspection qualité devient incontournable afin de renforcer la compétitivité d'une entreprise. Cependant, la mise en place d'un processus de contrôle qualité après chaque étape du processus de production est à la fois coûteux et chronophage. Avec l'évolution vers l'industrie 4.0, il est désormais possible d'optimiser les approches de contrôle qualité en intégrant des outils prédictifs basés sur l'intelligence artificielle en s'appuyant sur les données disponibles. Dans cet article, nous proposons une approche hybride combinant la robustesse des approches classiques basées sur les cartes de contrôle à la puissance des méthodes avancées d'apprentissage automatique pour détecter les défauts et améliorer la réactivité des entreprises manufacturières, leur permettant une prise de décision proactive. Plus précisément, un modèle de classification enrichie par des méthodes d'ingénierie des caractéristiques basé sur les cartes de contrôle est proposé. La méthodologie a été appliquée à un cas d'étude réel dans l'industrie automobile, démontrant son efficacité avec une augmentation du rappel de 20% par rapport aux méthodes existantes pour la détection des anomalies dans un processus d'assemblage semi-automatique et permettant aux opérateurs une meilleure anticipation des corrections nécessaires.**

***Abstract* – In today's increasingly demanding competitive environment, quality inspection is becoming an essential part of a company's competitive edge. However, implementing a quality control process after each stage of the production process is both costly and time-consuming. With the move towards Industry 4.0, it is now possible to optimize quality control approaches by integrating predictive tools based on artificial intelligence using the available data. In this paper, we propose a hybrid approach combining the robustness of classical control chart-based approaches with the power of advanced machine learning methods to detect the defects and improve the reactivity of manufacturing companies, enabling them to make proactive decisions. More specifically, a classification model enriched by feature engineering methods based on control charts is proposed. The methodology has been applied to a real-life case study in the automotive industry, demonstrating its effectiveness with a 20% increase in recall for anomaly detection in a semi-automated assembly process, and enabling operators to better anticipate necessary corrections.**

***Mots clés* – Apprentissage machine, Cartes de contrôle, industrie 4.0, Contrôle qualité.**
***Keywords* – Machine Learning, Control charts, Industry 4.0, Quality control.**

1 INTRODUCTION

Dans le contexte économique actuel, la qualité occupe une place centrale dans l'industrie manufacturière. Les processus de production contemporains se doivent donc d'être à la fois robustes et réactifs. C'est ainsi qu'identifier rapidement et efficacement les défauts suivis des mesures correctives nécessaires devient critique a la rentabilité des entreprises. Dans ce contexte, les cartes de contrôle, qui reposent sur les principes du contrôle statistique des procédés (SPC), ont depuis longtemps été des outils essentiels pour surveiller la stabilité et la fiabilité des performances des processus [Muehlenstaedt, 2018]. Elles se distinguent par leur capacité à détecter les variations anormales au sein des procédés. Cependant, ces outils présentent certaines limites, notamment un manque de granularité, ne fournissant pas d'informations détaillées sur l'origine des problèmes ni sur leurs causes sous-jacentes [Khalifa et al., 2023]. Avec la complexité croissante des environnements de production [Vidal & Coronado Hernández, 2021] et la grande quantité de données générées, les cartes de contrôle ont été remplacés, d'après la littérature, par des méthodes d'analyse plus avancées, telles que les techniques

d'analyse de données et d'intelligence artificielle. Contrairement aux approches classiques, les méthodes d'apprentissage automatique sont capables de traiter des ensembles de données complexes [Papavasileiou et al., 2024] et d'identifier des relations implicites entre les variables. Les méthodes d'apprentissage supervisé sont donc devenues les favorites pour la détection des anomalies, puisqu'elles ont un fort potentiel pour prévoir efficacement les défauts. Cependant, en l'absence de données explicatives et représentatives du contexte dans lequel elles sont acquises, il devient compliqué d'identifier les facteurs spécifiques à l'origine de ces anomalies rendant l'efficacité de ces méthodes limitée, imprécise ou inexplicable [Sankhye & Hu, 2020]. Afin de tenter d'amener une solution à ce problème dans le contexte de contrôle qualité, nous proposons d'intégrer les cartes de contrôle des paramètres de production critiques dans notre modèle de classification, pour permettre une meilleure contextualisation ainsi qu'une amélioration des capacités d'explication des sources de défauts.

Dans cet article, une méthodologie qui combine la méthode classique du contrôle statistique à des approches modernes d'apprentissage automatique est proposée pour répondre à l'objectif de détection des défauts et d'aide à la prise de décision proactive. L'article est structuré comme suit : la **section 2** présente l'état de l'art, en passant en revue les travaux précédents sur l'utilisation des cartes de contrôle, les méthodes d'apprentissage automatique et les approches hybrides pour la détection d'anomalie, afin de positionner ce travail dans le contexte scientifique. La **section 3** décrit la méthodologie développée pour atteindre l'objectif, en détaillant les principes, les outils et les étapes de mise en œuvre. La **section 4** met en œuvre cette méthodologie dans le cadre d'un cas d'étude concret, avec une analyse des données, des processus et des résultats obtenus. Enfin, la **section 5** présente les résultats de l'étude, discute les limites rencontrées et propose des perspectives pour les travaux futurs.

2 ÉTAT DE L'ART

2.1 Détection d'anomalie dans un processus de production

2.1.1 Les cartes de contrôle

Dans le domaine du contrôle qualité industriel, les cartes de contrôle sont des méthodes statistiques utilisées pour surveiller les processus de fabrication en détectant des variations anormales [Montgomery, 2009]. Plusieurs applications existent dans la littérature dans des domaines tels que l'industrie manufacturière, la biotechnologie et le transport, notamment pour les cartes de contrôle de la moyenne (cartes X-barre), les cartes de contrôle de l'étendue (cartes R) et les cartes écarts-types (cartes S). Dans l'industrie automobile [Teixeira et al., 2017], les cartes X-barre et R ont été exploitées pour la détection proactive des anomalies. Bien qu'elles augmentent la productivité et réduisent les coûts grâce à une diminution des déchets, les cartes univariées ne sont pas adaptées pour surveiller simultanément plusieurs variables corrélées. Des approches multivariées sont nécessaires, mais elles sont plus complexes à mettre en œuvre [Bersimis et al., 2006]. Dans les systèmes multivariés, les variables peuvent être corrélées hors les cartes de contrôle multivariées ne sont pas appropriées pour traiter les autocorrélations puisqu'elles supposent l'indépendance entre les variables [Montgomery & Mastrangelo, 1991].

2.1.2 Les méthodes d'apprentissage machine pour la détection d'anomalie

L'évolution des processus vers des systèmes plus complexes [Vidal & Coronado Hernández, 2021], a mené au développement des solutions de détection plus intelligente capables d'identifier non seulement la présence de défauts, mais également leurs causes. Par conséquent, l'intégration des techniques d'apprentissage automatique s'est donc imposée comme une avancée majeure, permettant d'améliorer la qualité en optimisant la détection, la prévention et la résolution des défauts. En effet, l'Isolation Forest et le One-Class SVM sont parmi les techniques les plus utilisées. Dans l'article [Yeganeh et al., 2023], elles ont été utilisées afin d'isoler les anomalies dans les pipelines de gaz naturel telles que les fuites, les surpressions et les défaillances matérielles, offrant ainsi des solutions automatisées pour prévenir les risques et améliorer la fiabilité des infrastructures. Bien que ces modèles aient démontré leur efficacité dans la détection des anomalies, leur performance peut être limitée dans des scénarios où les données présentent un fort déséquilibre. Dans ce contexte, les modèles ensemblistes se positionnent comme une alternative prometteuse. Dans l'étude [Sankhye & Hu, 2020], Random Forest et XGBoost offrent des solutions robustes pour la prédiction de la qualité en s'appuyant sur la combinaison de multiples apprenants faibles. Par ailleurs, les méthodes de boosting se révèlent particulièrement efficaces pour gérer le déséquilibre des classes, un défi fréquent dans la détection des défauts en milieu industriel [de Giorgio et al., 2023]. La performance des modèles ensemblistes dépend aussi de la pertinence et de la qualité des caractéristiques fournies. Dans des environnements industriels complexes, ces modèles peuvent échouer à capturer des informations clés si les données ne reflètent pas correctement les dynamiques du processus. [Sankhye & Hu, 2020] évoque la nécessité de construire des caractéristiques explicatives pour améliorer les modèles de détection.

2.2 Combinaison des méthodes avancées avec les méthodes classiques

Parmi les travaux trouvés dans la littérature, plusieurs chercheurs ont exploré aussi la combinaison des cartes de contrôle et des modèles avancés d'apprentissage machine pour la détection d'anomalie. Ces travaux sont répartis en deux approches, la première catégorie de travaux consiste à utiliser cartes de contrôle comme la carte T^2 de Hotelling et EWMA comme une étape préliminaire pour identifier les points qui sont hors de contrôle comme des anomalies potentielles. Les anomalies identifiées sont ensuite transmises dans des modèles avancés pour faire des analyses plus approfondies. Dans cette catégorie d'études, on trouve celles qui se concentrent sur la prédiction de maintenance à l'aide d'algorithmes comme Random Forest et CART decision Tree [Hsu et al., 2020], tandis que d'autres ciblent l'identification des causes des anomalies à l'aide d'un réseau de neurones de rétropropagation (BPNN) [Chen et al., 2024]. Diren & Boran [2024] ont quant à eux, développé un modèle combiné de boosting et de bagging pour permettre une identification rapide des causes des situations hors contrôle. La deuxième catégorie d'approches repose sur l'utilisation des modèles de régression et ceux basés sur l'apprentissage profond comme LSTM et Bi-LSTM [Tayalati et al., 2024] pour prédire les résidus dans les cartes de contrôle permettant ainsi une anticipation des déviations progressives dans les processus dynamiques [Yao, 2022]. Tran et al. [2021] ont aussi exploité les limites de contrôle dans la construction des seuils d'erreurs d'un autoencodeur LSTM pour détecter les

anomalies dans les séries temporelles multivariées. Les approches mentionnées ci-dessus ont certes permis d'améliorer les performances de détection des anomalies, mais leur adoption dans le milieu industriel demeure limitée. Cette réticence s'explique en partie par l'utilisation de méthodes non interprétables, telles que les réseaux de neurones [Chen et al., 2024]. Par ailleurs, les approches visant à identifier les causes des anomalies restent souvent trop complexes, nécessitant plusieurs étapes pour y parvenir. Par exemple, une méthode en quatre étapes est proposée [Hsu et al., 2020], incluant des analyses de corrélation, des études de clustering, l'utilisation de cartes de contrôle et le recours à l'expertise métier pour identifier les causes des anomalies. Même lorsque des cartes multivariées sont employées, comme dans les travaux de [Yao, 2022] et [Meng, 2024], une analyse individuelle des variables reste nécessaire, ce qui peut s'avérer particulièrement chronophage avec des processus multidimensionnels.

2.3 Analyse Critique

Bien que les résultats présentés ci-dessus sont utilisés dans la détection des anomalies industrielles, peu d'articles abordent la question de la réactivité face à ces anomalies. Ceci découle de l'utilisation des approches souvent peu explicables ou difficilement interprétables, telles que l'apprentissage profond [Chen et al., 2024], ou encore aux méthodes basées sur les cartes de contrôle qui sont incapables d'identifier les causes sous-jacentes des anomalies. Les cartes de contrôle requièrent très souvent des outils complémentaires [Hsu et al., 2020] ou des analyses individuelles [Yao, 2022] limitant leur déploiement en temps réel. D'une autre part, les approches recensées se concentrent principalement sur le traitement des anomalies liées au processus lui-même [Meng, 2024] tout en négligeant celles provenant de facteurs externes tels que les aspects humains, organisationnels ou les défaillances des composants, qui peuvent pourtant avoir un impact significatif sur la qualité du produit. Par ailleurs, d'autres études mettent l'accent sur les caractéristiques du produit sans accorder une attention suffisante aux paramètres de surveillance du processus [Sankhye & Hu, 2020] ce qui limite également l'efficacité globale de la détection.

À la lumière de cet état de l'art, deux principaux manquements sont identifiés. Premièrement, malgré la richesse des cartes de contrôle et leur utilité démontrée, celles-ci sont souvent utilisé comme un premier filtrage pour nourrir un modèle en limitant les données d'entrées de celui-ci. Cela transfère donc les erreurs des cartes de contrôle au modèle, sans possibilité d'amélioration des prévisions pour les points de données éliminés. La littérature démontre qu'un manque d'attention est porté à l'intégration des contraintes industrielles aux modèles, ce qui limite les capacités d'explicabilité des causes des défauts. Deuxièmement, on souligne un manque d'adoption des approches basées sur des modèles explicables pour la détection d'anomalie ce qui limite la capacité opérationnelle à réagir rapidement pour limiter les pertes liées aux défauts. Afin de traiter ces manquements, la section 3 présente la méthodologie proposée permettant d'intégrer directement de multiples cartes de contrôle statistiques dans le cadre des modèles d'apprentissage automatique en plus d'intégrer d'enrichir les données pour une meilleure capacité d'explicabilité améliorant les capacités réactives.

3 METHODOLOGIE PROPOSEE

La méthodologie proposée vise à améliorer la réactivité opérationnelle à la défectuosité dans les produits finaux et l'efficacité du processus de production.

Cette approche repose sur l'analyse des données industrielles en combinant les capacités issues des cartes de contrôle avec la puissance des modèles de classification pour identifier rapidement les anomalies susceptibles à générer des défauts.

La méthodologie proposée tel que présentée dans la Figure 1, est structurée sur cinq étapes : (1) La compréhension et le prétraitement des données, ce qui consiste à comprendre le cas d'étude en détaillant et traitant les données collectées; (2) L'ingénierie des caractéristiques (ou *Le feature engineering),* qui a pour objectif d'enrichir le jeu de données ; (3) la construction des cartes de contrôle afin d'extraire les informations essentielles concernant la stabilité du processus ; (4) le modèle de classification qui va permettre la détection proactive d'un potentiel défaut de production et Finalement (5) l'évaluation du modèle .

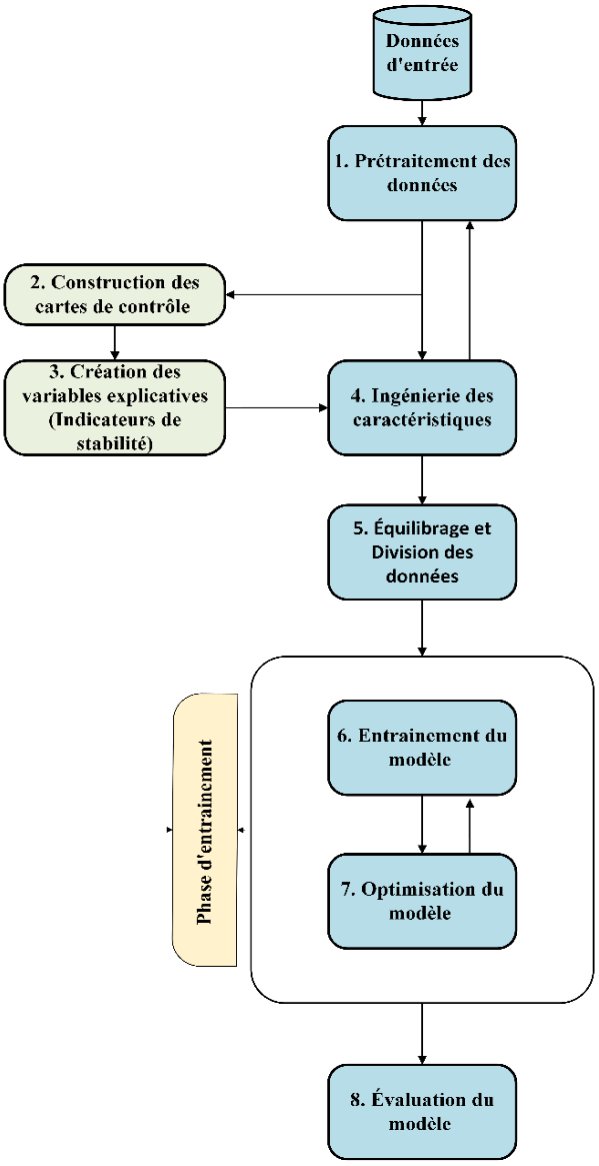


Figure 1. Méthodologie proposée

3.1 Compréhension et prétraitement des données

3.1.1 Compréhension des données

Cette méthodologie est applicable dans le contexte ou les données disponibles proviennent d'un processus industriel de production et contiennent un ensemble de **M** produits dont chacun est décrit par **N** variables. Chaque instance $\mathbf{x_n}$ représente un ensemble de caractéristiques spécifiques au produit **n** et elle est associée à une étiquette $\mathbf{y_n}$ qui indique la qualité du produit, indiquant si un défaut est détecté ($y_n = 1$) ou non ($y_n=0$).

Les $\mathbf{N_r}$ variables retenues sont soigneusement identifiées en utilisant premièrement l'analyse exploratoire des données suivie de l'étape de sélection de données conformément à la méthodologie CRISP-DM [Wirth & Hipp, 2000]. Puis la collaboration avec les experts et les opérateurs industriels a permis de cibler d'autres paramètres susceptibles d'être associés à des défauts spécifiques observés dans les produits finaux.

Les données liées à la qualité en industrie se caractérisent souvent par un fort déséquilibre entre la classe minoritaire (produits défectueux) et la classe majoritaire (produits de qualité) dans **Y**. La classe minoritaire fait référence à la classe qui possède peu d'échantillons dans les données **X**. Le ratio entre ces deux classes est appelé rapport de déséquilibre (**imbalance Ratio** ou **IR**). Il est défini comme la proportion du nombre d'échantillons dans la classe majoritaire ($y_n=0$) par rapport au nombre d'échantillons dans la classe minoritaire ($y_n=1$).

3.1.2 Prétraitement des données

L'analyse de données nécessite de prétraiter d'une manière itérative celles-ci afin de les rendre exploitables. Les produits manufacturés sont habituellement décrits par des attributs catégoriques représentant leurs principales caractéristiques opérationnelles comme la machine allouée et le type de produit, ainsi que par des attributs numériques enregistrant des valeurs des paramètres mesurés des processus physiques qu'elles représentent. Les étapes de prétraitement des données utilisées dans cette méthodologie ont été appliquées sur la table qui fait la jointure entre la table de production et la table d'inspection et seront détaillées dans la section 4. Toutefois, elles ne se limitent pas à celles-ci d'autres étapes issue de la méthode CRISP-DM [Wirth & Hipp, 2000] comme la suppression de bruits, un formatage de type de données, ont également été appliquées pour garantir une préparation approfondie des données.

3.2 Cartes de contrôle

L'utilisation des cartes de contrôle est l'approche classique pour l'analyse systématique des variations et la détection des causes d'instabilité dans un processus. La carte X-barre est utilisée pour suivre la moyenne d'un processus en regroupant les données. Chaque sous-groupe contient des observations collectées dans des conditions similaires et à des intervalles réguliers. La moyenne de chaque sous-groupe est calculée à l'aide de l'équation (1) pour surveiller si elle reste à l'intérieur des limites de contrôle spécifiées. Ces limites, définies comme limite supérieure de contrôle (UCL_i) et limite inférieure de contrôle (LCL_i) sont respectivement données par les équations (2) et (3). Si une moyenne calculée dépasse ces limites, cela indique une variation inhabituelle dans le processus, signalant un potentiel hors contrôle et nécessitant une investigation approfondie pour identifier et corriger une éventuelle cause assignable.

$$\bar{X}_\mathbf{i} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} X_{ij} \quad (1)$$

où $\bar{X}_\mathrm{i}$ est la moyenne sur un groupe de taille n des différentes valeurs X_{ij} de la caractéristique i pour laquelle la carte de contrôle sera construite.

$$UCL_i = \sum_{j=1}^{m} \bar{X}_{i,j} + A_2 * R \quad (2)$$

$$LCL_i = \sum_{j=1}^{m} \bar{X}_{i,j} - A_2 * R \quad (3)$$

où $\bar{X}_{i,j}$ est la moyenne du groupe , A_2 est un coefficient tabulé, R représente la moyenne des étendues des sous-groupes.

Afin de valider l'analyse, la carte X-barre est accompagnée de la carte R qui est utilisée pour surveiller la dispersion des données au sein de chaque sous-groupe en calculant l'étendue des observations, c'est-à-dire la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale comme indiquée dans l'équation (4). Les limites de contrôle de la carte R (UCL_R) et (LCL_R) sont calculées à l'aide des équations (5) et (6). Si une étendue dépasse ces limites, cela indique une variation anormale dans la dispersion du processus, signalant une instabilité.

$$R_i = \max(X_{i,j}) - \min(X_{i,j}) \text{ pour j= 1,2,..,n} \quad (4)$$

où R_i est l'étendue, calculée comme la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale des observations X_{ij} d'un sous-groupe de taille n, pour lequel la carte de contrôle sera construite.

$$UCL_R = D_4 * \bar{R} \quad (5)$$

$$LCL_R = D_3 * \bar{R} \quad (6)$$

où D_4 et D_3 sont des coefficients tabulés en fonction de la taille du sous-groupe . Ces coefficients tiennent compte des variations naturelles attendues dans les échantillons et garantissent des limites adaptées à la taille des sous-groupes.

Dans le cadre de cette méthodologie, de multiples cartes de contrôle sont produites pour chaque caractéristique considérée comme critique lors de la première étape de compréhension de données et des discussions avec les experts industriels. Des variables numériques extraites de ces celles-ci sont alors exploitées comme des données d'apprentissage pour le modèle de classification. Cela permettra d'améliorer la capacité des modèles à prédire et d'expliquer les causes de non-qualité par l'intégration de variables représentant les fluctuations des caractéristiques critiques du processus de production.

3.3 Ingénierie des caractéristiques

Cette étape permet d'améliorer les performances du modèle en offrant l'intégration de nouvelles informations contextuelles sous forme de variables. Ces variables sont conçues pour suivre les dynamiques spécifiques du processus de production et améliorer la capacité du modèle à détecter les défauts. Nous proposons de mettre un accent particulier sur la vérification des caractéristiques critiques à la qualité, notamment en évaluant le respect des limites de tolérance définies et la quantification des

dépassements ainsi que leur influence par rapport à l'intégrité du produit fini. Les données peuvent également être enrichies par l'ajout de variables liées aux matériaux utilisés, telles que leurs spécificités chimiques, ou aux conditions climatiques, comme les variations de température et d'humidité.

3.4 Classification

Après avoir préparé le jeu de données en le nettoyant et en l'enrichissant avec des variables considérées comme pertinentes et adaptées au contexte manufacturier, l'étape suivante vise à atteindre l'objectif principal : détecter la défectuosité et aider à la prise de décision proactive.

Dans la méthodologie proposée, cette prédiction est formulée comme un problème binaire, ouvrant la voie à l'utilisation de diverses méthodes de classification. Ces méthodes incluent des approches fondamentales telles que les arbres de décision, les machines à vecteurs de support (SVM) et les modèles Naïfs Bayes, ainsi que des approches plus avancées basées sur des techniques d'ensemble, regroupées en deux grandes catégories: le bagging, représenté par des méthodes comme les forêts aléatoires, et le boosting, incluant des algorithmes comme XGBoost ou AdaBoost.

Étant donné que la plupart des méthodes possèdent des forces spécifiques et reposent sur des hypothèses concernant la nature du jeu de données, la méthode proposée dans cet article a été suffisamment généralisée pour couvrir la majorité des cas d'études liées à la prédiction de la conformité de la qualité dans un environnement manufacturier.

Après une analyse comparative rigoureuse des performances, combinée à un entraînement itératif et une optimisation progressive des différentes techniques, XGBoost a été choisi comme modèle principal pour nos expérimentations garantissant une précision et une fiabilité accrues en raison de sa robustesse face à la nature déséquilibrée de données de qualité dans le contexte de détection de la défectuosité [Sankhye & Hu, 2020]. En outre, sa capacité à fournir des résultats explicables représente un avantage essentiel et offre aux opérateurs des informations exploitables pour orienter leurs décisions de production.

3.5 Évaluation du modèle

La dernière étape de cette méthodologie est l'évaluation du modèle de machine learning, visant à déterminer le niveau de confiance dans les prédictions générées. Pour évaluer la fiabilité du modèle de classification, la précision globale (accuracy), est souvent utilisée. Toutefois, il convient de noter que cette métrique peut être mal interprétée dans un contexte de données très déséquilibrées [Chatterjee, 2023]. Par exemple, une précision peut être biaisée par la classe majoritaire puisque l'abondance des données de cette classe permet au modèle d'apprendre mieux le schéma de cette classe. Dans cette méthodologie, des métriques adaptées aux contextes déséquilibrés ont été privilégiées. Nous utilisons notamment la précision équilibrée (balanced accuracy), le F1-score global et la moyenne géométrique (G-mean) et le rappel (recall) [Haixiang, 2016]. Ces indicateurs permettent une évaluation plus représentative des performances du modèle sur les deux classes, étant donné qu'ils mesurent les performances du modèle à reconnaître les classes positives et négatives. Ces métriques permettent alors de déterminer le degré de biais inductif et de garantir une analyse équilibrée et adaptée aux exigences spécifiques du problème étudié.

4 CAS D'ETUDE

La méthodologie proposée a été appliquée à un cas d'étude réel dans le secteur manufacturier des pneumatiques afin d'être validée. Une industrie multinationale a exprimé le besoin de détecter un type spécifique de défaut lié à leur processus d'assemblage, qui est un processus semi-automatique composé de deux parties parallèles, elles-mêmes assemblées en phase finale. Le défaut étudié provient de la première étape d'assemblage et se manifeste par une mauvaise adhérence des composants intrinsèques du produit, compromettant ainsi sa qualité finale. Dans les sections suivantes, nous allons valider la méthodologie proposée à la section 3 en l'appliquant à un cas concret fourni par notre partenaire industriel.

4.1 Compréhension et prétraitement des données

4.1.1 Compréhension des données

Les données utilisées dans cette étude sont des données historiques enregistrées à partir des capteurs des machines d'assemblage. Cet ensemble de données comprend 364 192 produits normaux et 757 produits défectueux, collectées sur une période de 7 mois. Ce déséquilibre marqué se traduit par un rapport de déséquilibre (Imbalance Ratio, IR) de 481:1, illustrant clairement l'écart important entre les classes, où la classe minoritaire représente 0.19% de l'ensemble de données.

Chaque produit est décrit par 34 variables, comprenant un identifiant unique, le type de machine sur laquelle il est assemblé, considérées comme des données catégoriques. Par ailleurs, des paramètres mesurés à partir de capteurs sont enregistrés sous forme de données numériques.

4.1.2 Prétraitement des données

Dans cette étude, plusieurs étapes de prétraitement des données classiques inspirées de la méthodologie CRISP-DM ont été appliquées. Les données brutes sont nettoyées et transformées en supprimant le bruit causé par les mauvaises lectures des capteurs sur les paramètres mesurés, la conversion des types de données afin d'assurer leur compatibilité avec le modèle mais aussi la gestion des valeurs manquantes et les données catégoriques.

a) Gestion des valeurs manquantes

Étant donné que les données collectées proviennent de capteurs, il est courant de rencontrer des valeurs manquantes, causées par exemple par des pannes ou des dysfonctionnements des capteurs. Cela rend essentiel le recours à une imputation de valeurs ou à la suppression des enregistrements. Pour éviter la perte significative d'informations, en particulier celles relatives aux défauts, nous optons premièrement pour l'imputation puis la suppression. Pour répondre à ce défi, une méthode en trois étapes, comme illustré dans la Figure 2, a été mise en œuvre. Tout d'abord une imputation par propagation est appliquée. Cette technique se base sur l'hypothèse que certains produits successifs partageant les mêmes caractéristiques de fabrication peuvent avoir des valeurs similaires. Ensuite, pour les cas où deux produits successifs ne sont pas de même type, nous avons opté pour une modélisation basée sur la régression linéaire afin d'estimer les valeurs manquantes. Finalement, il reste un total de 4% d'observations avec des données manquantes qui seront ensuite supprimées.

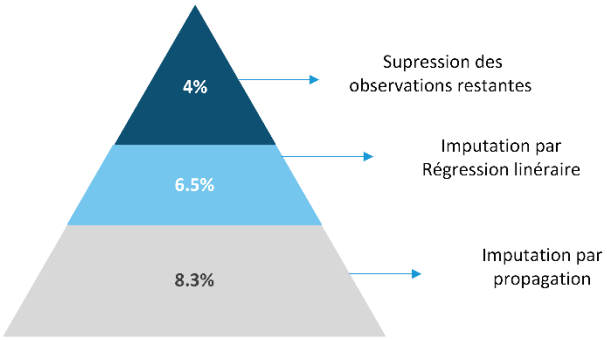


Figure 2. Pourcentage des valeurs manquantes dans chaque étape du processus de gestion de valeurs manquantes

b) Gestion des attributs catégoriques

Dans nos données, certaines catégories sont surreprésentées par rapport à d'autres. Afin de mettre en évidence la distribution de ces catégories, un codage fréquentiel a été appliqué. En d'autres termes, une représentation basée sur la fréquence d'apparition de chaque attribut catégorique est utilisée pour encoder l'information. Ce procédé permet au modèle de considérer aussi les catégories rares et d'enrichir les représentations numériques des variables catégorielles.

4.2 Cartes de contrôle

Étant donné que les caractéristiques du processus d'assemblage sont des variables continues suivant une distribution normale, les cartes de contrôle X-barre et R ont été construites en tenant compte du type de produit et de la machine utilisée. Les échantillons ont été regroupés selon la méthode de sous-groupement rationnel, adaptée à un environnement Six Sigma, pour assurer un suivi précis des variations spécifiques à chaque configuration de produit et machine. Quatre caractéristiques critiques ont été identifiées. Pour chacune d'entre elles, nous avons généré les cartes de contrôle associées. Les cartes de contrôle présentées dans la Figure 3 est un exemple visuel d'une carte de contrôle pour un type de produit particulier et une machine particulière.

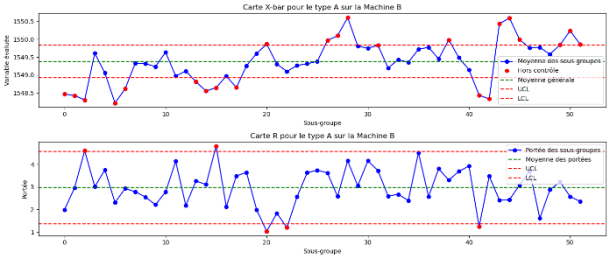


Figure 3. Les cartes X-barre et R

Suite à la construction des cartes de contrôle, l'analyse des points hors contrôle (représentés en rouge) a permis d'identifier 460 défauts apparaissant parmi ces points. Cela suggère que les cartes de contrôle peuvent potentiellement aider à identifier environ 61 % de l'ensemble des défauts. Cependant, il a également été constaté que les points hors contrôle ne sont pas toujours étroitement liés aux défauts réels. En d'autres termes, une proportion significative de ces points correspondent à des fausses alarmes et ne sont pas directement liés à des anomalies affectant la qualité, ce qui souligne la nécessité d'une analyse complémentaire pour affiner cette corrélation.

4.3 Ingénierie des caractéristiques

Cette étape vise à améliorer la qualité des données et à mettre en valeur certaines contraintes industrielles essentielles. Afin de mieux comprendre la corrélation entre les défauts et les autres caractéristiques, de nouvelles variables sont développées.

4.3.1 Caractérisation des dépassements de tolérance

Dans le contexte d'assemblage automatisé, certaines mesures X_i doivent respecter les plages de tolérance définies par la machine. Ces tolérance sont caractérisées par une borne maximale T_{max} et une borne minimale T_{min}. Afin de quantifier l'ampleur des écarts par rapports aux limites spécifiées, nous proposons ces nouvelles variables :

a) Le dépassement de la limite supérieure

$$E_{max} = max(X_i - T_{max}, 0) \quad (7)$$

b) Le dépassement de la limite inférieure

$$E_{min} = min(X_i - T_{min}, 0) \quad (8)$$

Où E_{max} représente l'ampleur de l'écart par rapport à la borne maximale lorsque $X_i > T_{max}$ et E_{min} représente l'ampleur de l'écart par rapport à la borne minimale lorsque $X_i < T_{min}$. Si la mesure X_i est conforme aux tolérances, les deux caractéristiques sont nulles.

4.3.2 Proximité d'un changement de matériel

L'assemblage automatisé peut nécessiter un changement d'équipement régulier pouvant ainsi entrainer des perturbations transitoires impactant la qualité du produit. Pour faire apprendre au modèle à détecter les effets des transitions pré- et post-réinitialisation, nous avons modéliser deux autres nouvelles variables.

- Une variable absolue qui mesure le nombre d'unités produites n depuis la dernière réinitialisation d'équipement n_0.

$$V_a = n - n_0 \quad (9)$$

- Une variable continue qui normalise cette distance par rapport aux séquences de réinitialisation d'équipement.

$$V_c = \frac{n - n_0}{n} \quad (10)$$

4.3.3 Variables liées aux cartes de contrôle

Les cartes de contrôle traduisent les anomalies qui peuvent être issues du processus d'assemblage. Pour affiner l'analyse des points hors contrôle dans les cartes de contrôle, deux nouvelles variables ont été créées. La première variable indique si un produit dépasse ou non les limites de contrôle et la deuxième

variable mesure la distance d'un point par rapport à la limite de contrôle.

4.4 Résultats du modèle de Classification

Les résultats présentés proviennent du modèle XGBoost, reconnu pour sa robustesse face aux données déséquilibrées grâce à son mécanisme de boosting, qui réduit efficacement l'erreur tout en gérant de grands volumes de données. Les hyperparamètres ont été optimisés à l'aide d'une recherche aléatoire (**randomized search**) effectuée sur les 100 meilleurs modèles identifiés. Une grille de recherche enrichie a été définie pour explorer un large espace de configurations. Une attention particulière a été portée à trois paramètres clés : la profondeur maximale (*max_depth*) et le taux d'apprentissage (*learning_rate*) pour assurer un compromis entre complexité modérée du modèle et finesse d'apprentissage et le facteur d'ajustement du déséquilibre de classes (*scale_pos_weight*) qui a été défini à partir du rapport de déséquilibre (*IR*) afin de corriger le déséquilibre entre les classes. La plage de valeurs testées pour ces hyperparamètres est résumée dans la Tableau 1. Chaque configuration a été évaluée à l'aide d'une validation croisée par 5-fold et les meilleures performances ont été retenues en terme de F1-score macro.

Tableau1. Espace de recherche des hyperparamètres 1

Hyperparamètre	*Plages de valeurs*
max_depth	[3, 4, 5, 7, 10, 15]
learning_rate	[0.1, 0.01, 0.05]
scale_pos_weight	[*IR*, *IR* * 1.5, *IR* * 2]

Le meilleur modèle a ensuite été évalué sur un jeu de test composé de **109 208 observations**, dont seulement **226 correspondent à des défauts**. L'évaluation a été réalisée à l'aide de cinq métriques : la précision globale (**accuracy**), la précision équilibrée (**balanced accuracy**), la moyenne du score f1 (**average F1-score**) et la moyenne géométrique (**G-mean**) et le rappel (**recall**) de la classe des produits défectueux**.**

Le Tableau 2 présente une comparaison des résultats obtenus pour le modèle de base et le modèle proposé. Le modèle XGboost classique correspond à la version initiale, sans modification majeure, mais tout de même avec un ajustement des hyperparamètres (**fine-tuning**) et l'introduction d'un hyperparamètre spécifique pour équilibrer les données. Le deuxième modèle correspond à celui développé après l'application de la méthodologie proposée.

Tableau2. Tableau de comparaison entre les résultats des modèles

	Précision Globale	*Précision équilibrée*	*Moyenne géométrique*	*Moyenne du Score f1*	*Rappel*
XGboost classique	0.99	0.63	0.51	0.54	0.27
Modèle proposé	0.95	**0.71**	**0.66**	0.50	**0.47**

Les résultats du modèle proposé mettent en évidence une progression significative des performances. Dans sa version initiale, sans modification, le modèle présente une précision globale élevée, mais cela masque ses faibles performances sur la classe minoritaire (défauts), détectées avec des métriques comme le rappel et la moyenne géométrique restant médiocres, reflétant une incapacité à détecter efficacement les anomalies.

Enfin, l'intégration des variables issues des cartes de contrôle dans notre ensemble de données et l'enrichissement avec l'ingénierie des caractéristiques permettent au modèle de capturer des dynamiques spécifiques au processus, renforçant sa capacité à identifier les défauts, avec un rappel de la classe minoritaire atteignant 0.47. Bien que la précision globale diminue légèrement (0.95) mais une augmentation notable des métriques adaptées aux données déséquilibrées, comme la précision équilibrée et la moyenne géométrique. Une analyse des variables les plus influentes a révélé que certains indicateurs issus des cartes de contrôle contribuent à la performance du modèle, parmi lesquels la distance d'un point à sa limite de contrôle en suggérant qu'un écart important par rapport aux seuils de stabilité du processus est souvent lié à l'apparition de défauts. Cette méthodologie a permis donc de rendre le modèle plus équilibré et adapté aux besoins industriels, démontrant ainsi l'importance d'une approche progressive pour améliorer la détection des défauts dans un contexte de données déséquilibrées.

5 CONCLUSION

Cet article décrit une approche d'intégration des cartes de contrôle avec des méthodologies avancées afin de répondre à des enjeux du contrôle de qualité dans le milieu industriel. Nous avons mis au point un modèle de classification basé sur XGBoost capable d'identifier efficacement les défauts et d'aider à la décision proactive dans un environnement de fabrication réel. Contrairement aux méthodes traditionnelles, notre approche intègre les informations issues des cartes de contrôle pour enrichir les données d'entrée des modèles prédictifs. Cette démarche permet non seulement une meilleure caractérisation des anomalies et une détection significativement améliorée des défauts, mais offre également la possibilité d'expliquer ces anomalies à partir du modèle. Nos résultats appliqués pour des données fortement déséquilibrées dans le secteur automobile, soulignent le potentiel d'amélioration de la détection de défaut de 27% à 47%. Cette méthodologie met en évidence des informations exploitables pour une prise de décision proactive.
Bien que la méthodologie soit prometteuse, certaines limites subsistent. Une première réside dans le fait que les caractéristiques utilisées pour construire les cartes de contrôle sont étroitement liées aux défauts étudiés. C'est à dire que les variables retenues ne sont pas représentatives de l'ensemble des anomalies possibles dans un contexte manufacturier plus large. En outre, cette étude repose sur une expertise pointue pour identifier les variables pertinentes et traduire les connaissances du domaine en des indicateurs mesurables. Par conséquent, l'adaptation de cette méthodologie à d'autres types de procédés industriels nécessiterait une redéfinition des indicateurs en fonction des spécificités de chaque environnement de production. De plus, bien que les hyperparamètres aient été ajustés pour tenter d'équilibrer l'entrainement du modèle, la rareté des données de défaut peut limiter les capacités du modèle. À cet égard, l'utilisation d'une recherche plus exhaustive des hyperparamètres, pourrait permettre d'explorer plus finement l'espace des paramètres et d'améliorer la performance du modèle malgré les contraintes liées aux données.

6 REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le partenaire industriel pour sa précieuse collaboration tout au long de ce projet. Leur présence, leurs échanges constructifs, et la richesse de leurs contributions pratiques ont grandement enrichi cette recherche. Nous sommes reconnaissants pour leur disponibilité, leur partage d'informations essentielles et leur implication active, qui ont été des éléments clés pour la réussite de ce travail.

7 REFERENCES

Bersimis, S., Psarakis, S., & Panaretos, J. (2007). Multivariate statistical process control charts: an overview. *Quality and Reliability engineering international*, *23*(5), 517-543.

Chatterjee, S., & Byun, Y. C. (2023). Highly imbalanced fault classification of wind turbines using data resampling and hybrid ensemble method approach. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *126*, 107104.

Chen, B. S., Huang, C. C., Liao, T. W., & Kuo, C. F. J. (2024). Integration of the multivariate statistical control chart and machine learning to identify faults in the quality characteristics for polylactic acid with glass fiber composites in injection molding. *Textile Research Journal*, *94*(19-20), 2130-2146.

de Giorgio, A., Cola, G., & Wang, L. (2023). Systematic review of class imbalance problems in manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, *71*, 620-644.

Diren, D. D., & Boran, S. (2024). Classification of Quality Defects using Multivariate Control Chart with Ensemble Machine Learning Model. *Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications*, *7*(2), 129-144.

Haixiang, G., Yijing, L., Shang, J., Mingyun, G., Yuanyue, H., & Bing, G. (2017). Learning from class-imbalanced data: Review of methods and applications. *Expert systems with applications*, *73*, 220-239.

Hsu, J. Y., Wang, Y. F., Lin, K. C., Chen, M. Y., & Hsu, J. H. Y. (2020). Wind turbine fault diagnosis and predictive maintenance through statistical process control and machine learning. *Ieee Access*, *8*, 23427-23439.

Khalifa, R. M., Yacout, S., & Bassetto, S. (2024). Root cause analysis of an out-of-control process using a logical analysis of data regression model and exponential weighted moving average. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *35*(3), 1321-1336.

Meng, B., Loonen, R. C., & Hensen, J. L. (2024). Leveraging dynamic power benchmarks and cusum charts for enhanced fault detection in distributed pv systems. *Energy Conversion and Management*, *314*, 118692.

Montgomery, D. C. (2009). *Statistical quality control* (Vol. 7). New York: Wiley.

Montgomery, D. C., & Mastrangelo, C. M. (1991). Some statistical process control methods for autocorrelated data. *Journal of quality technology*, *23*(3), 179-193.

Muehlenstaedt, T. (2018). Control charts in a multi product environment: An application study. *arXiv preprint arXiv:1801.01660*.

Papavasileiou, P., Giovanis, D. G., Pozzetti, G., Kathrein, M., Czettl, C., Kevrekidis, I. G., ... & Koronaki, E. D. (2025). Integrating supervised and unsupervised learning approaches to unveil critical process inputs. *Computers & Chemical Engineering*, *192*, 108857.

Sankhye, S., & Hu, G. (2020). Machine learning methods for quality prediction in production. *Logistics*, *4*(4), 35.

Tayalati, F., Boukrouh, I., Azmani, A., & Azmani, M. (2024, August). Deep Learning-Based Intelligent X-Bar Control Chart for Monitoring Manufacturing Process. In *2024 IEEE International Conference on Artificial Intelligence in Engineering and Technology (IICAIET)* (pp. 260-265). IEEE.

Teixeira, E. L., Dias, T. S., Andrade, M. D. O., & Oliveira, A. B. S. (2017, December). Statistical process control application in automotive industry. In *24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering. International Journal of Industrial Engineering and Management* (Vol. 7, No. 1, pp. 01-08).

Tran, P. H., Ahmadi Nadi, A., Nguyen, T. H., Tran, K. D., & Tran, K. P. (2022). Application of machine learning in statistical process control charts: A survey and perspective. In *Control charts and machine learning for anomaly detection in manufacturing* (pp. 7-42). Springer, Cham.

Herrera Vidal, G., & Coronado Hernández, J. R. (2021). Complexity in manufacturing systems: a literature review. *Production Engineering*, *15*, 321-333.

Wirth, R., & Hipp, J. (2000, April). CRISP-DM: Towards a standard process model for data mining. In *Proceedings of the 4th international conference on the practical applications of knowledge discovery and data mining* (Vol. 1, pp. 29-39).

Yao, W., Li, D., & Gao, L. (2022). Fault detection and diagnosis using tree-based ensemble learning methods and multivariate control charts for centrifugal chillers. *Journal of Building Engineering*, *51*, 104243.

Yeganeh, A., Chukhrova, N., Johannssen, A., & Fotuhi, H. (2023). A network surveillance approach using machine learning based control charts. *Expert Systems with Applications*, *219*, 119660.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Les Facteurs Clés de Succès et les Barrières à la mise en œuvre de la Total Quality Management

HOUDA ZOUAGHA[1,2], ABDESSAMAD KOBI[1], KARIM KAMMOUN[2], LOTFI AZZABI[3]

[1] Université Angers, Polytech, LARIS
62 Av. de Notre Dame du Lac, 49000 Angers, France
houda.zouagha@etud.univ-angers.fr
abdessamad.kobi@univ-angers.fr

[2] Université de Sfax, ISGIS, CoDECI
Route de Tunis Km 10.5, Technopole de Sfax, 3021 Sfax, Tunisie
kammoun_karim@yahoo.fr

[3] Université Angers, Polytech, LARIS
Rue Léonard de Vinci-CS 36152, 53062 Laval, France
lotfi.azzabi@mayenne.cci.fr

***Résumé* – Cette recherche explore les facteurs clés de succès (FCS) et les barrières à la mise en œuvre de la Total Quality Management (TQM) à travers une revue approfondie des travaux existants. L'analyse commence par une revue de la littérature sur les facteurs déterminants pour la réussite de la TQM, puis applique le principe de Pareto pour identifier les facteurs les plus importants. Cela permet de mettre en évidence les leviers prioritaires pour optimiser l'efficacité de la TQM. La recherche examine aussi les obstacles à l'application de la TQM, en utilisant la méthode Fuzzy DEMATEL pour analyser les interactions entre ces barrières et identifier les plus influentes. Enfin, elle introduit le concept de GREEN TQM, qui intègre des pratiques écologiquement responsables dans la gestion de la qualité.**

***Abstract* – This research explores the key success factors (KSFs) and barriers to Total Quality Management (TQM) implementation through an in-depth review of existing work. The analysis begins with a literature review of the determining factors for TQM success, then applies the Pareto principle to identify the most important factors. This highlights the priority levers for optimizing TQM effectiveness. The research also examines the barriers to TQM implementation, using the Fuzzy DEMATEL method to analyze the interactions between these barriers and identify the most influential ones. Finally, it introduces the concept of GREEN TQM, which integrates environmentally responsible practices into quality management.**

***Mots clés* - Gestion de la qualité totale, Facteurs Clés de Succès de la TQM, Barrières de la TQM, Pareto, Fuzzy DEMATEL.**
***Keywords* – Total Quality Management, TQM Key Success Factors, TQM Barriers, Pareto, Fuzzy DEMATEL.**

1 INTRODUCTION

Les organisations sont confrontées à des défis majeurs pour s'adapter à un environnement concurrentiel en constante évolution [Enquist et al., 2015]. La TQM est largement reconnue comme une stratégie efficace d'amélioration continue des processus et de performance, tant dans les services [Ndihokubwayo et al., 2019 ; Saleh et al., 2018 ; Aamer et al., 2017 ; Talib et Rahman, 2015] que dans l'industrie manufacturière [Talapatra et Uddin, 2019 ; Muruganantham et al., 2018]. En intégrant la TQM, les organisations cherchent à optimiser l'efficacité des processus, renforcer la satisfaction client et améliorer la qualité des produits et services. Toutefois, malgré ses avantages, la mise en œuvre de la TQM présente plusieurs défis majeurs. L'identification des Facteurs Clés de Succès (FCS) et des barrières est essentielle pour améliorer la performance globale des organisations [Hietschold et al., 2014].

Si l'adoption de la TQM génère des bénéfices significatifs, tels que l'amélioration de la qualité et la réduction des coûts, les résultats obtenus varient d'une organisation à l'autre en raison des obstacles rencontrés. Ces barrières ne se limitent pas à entraver la mise en œuvre de la TQM, mais elles interagissent entre elles, rendant leur gestion encore plus complexe. Il est donc crucial de les analyser pour identifier celles qui sont motrices et celles qui sont dépendantes, afin de mieux adapter les stratégies organisationnelles.

Dans cette recherche, 145 études ont été analysées pour identifier les principaux éléments influençant la TQM. Parmi elles, 54 FCS ont été recensées, mettant en évidence leur rôle positif dans l'amélioration de la performance organisationnelle. Parallèlement, 49 études traitant des barrières ont permis d'identifier 50 obstacles majeurs freinant

l'implémentation efficace de la TQM. Cette analyse souligne à la fois les avantages et les défis liés à son adoption.

Cette recherche vise à explorer en profondeur les FCS et les barrières à la mise en œuvre de la TQM. Pour ce faire, deux outils seront mobilisés. L'analyse PARETO servira à identifier les facteurs les plus influents. La méthode Fuzzy DEMATEL permettra quant à elle d'examiner les interrelations entre les barrières, afin de mieux comprendre leur impact et de proposer des stratégies adaptées.

2 TOTAL QUALITY MANAGEMENT

La littérature offre une pléthore de définitions explorant la notion de la TQM, fournissant ainsi diverses interprétations et perspectives sur cette discipline. Malgré cette richesse, introduire une définition universelle unique de la TQM reste difficile [Lau et Anderson, 1998]. Chaque chercheur en qualité propose sa propre définition, ce qui crée une absence de consensus universel sur la définition de la TQM [Ooi et al., 2007 ; Sila et Ebrahimpour, 2003 ; Martinez-Lorente et al., 1998]. Al-Ababneh [Al-Ababneh 2011] a proposé une définition complète de la TQM. Selon lui, la TQM est une "philosophie de gestion" qui repose sur un ensemble de principes, techniques et outils. Son objectif est d'améliorer en continu la qualité des processus, des produits, des services et des personnes. Cela implique également de mobiliser l'ensemble des employés pour atteindre une satisfaction client supérieure. Edwards Deming [Davids 1999], pionnier de la TQM, a également promu l'idée que la qualité est perçue comme "un degré prévisible d'uniformité et de fiabilité, conforme à une norme de qualité adaptée au client". Dans l'ensemble, la majorité des définitions de la TQM mettent en avant son rôle en tant que philosophie de gestion. Cette approche favorise une culture organisationnelle axée sur la satisfaction du client. Elle repose sur le principe d'amélioration continue des processus et des pratiques au sein de l'organisation.

3 LES FACTEURS CLES DE SUCCES DE LA TQM

Dans leur quête d'amélioration continue et de performance accrue, les entreprises cherchent à mettre en œuvre la TQM afin d'optimiser leurs processus et garantir une meilleure qualité. L'analyse des études recensées a permis d'identifier un ensemble de FCS essentiels à la mise en œuvre de la TQM. En consolidant les résultats de 145 recherches, un total de 54 FCS a été extrait. Parmi eux, 13 FCS dominants représentaient 80 % des occurrences, tandis que les 41 restants ne comptaient que pour 20 % des occurrences, comme illustré dans le **Tableau 1**. Le graphique de Pareto de la **Figure 1** met en évidence les 54 FCS, identifiant les 80 % les plus influents, dits « effets », classés par fréquence. Ces FCS sont fréquemment cités dans la littérature et doivent être prioritaires pour les gestionnaires de la TQM, tout en gardant à l'esprit l'importance des 20 % restants, dits « causes ». Selon le diagramme de Pareto, certains FCS, tels que la « Gestion de la relation client » (CRM), ont une influence majeure sur la mise en œuvre de la TQM. Avec 116 occurrences, ce facteur montre son importance cruciale dans l'implémentation de la TQM. La littérature [Ali et Johl, 2022 ; Alzoubi et Ahmed, 2019 ; Pradhan, 2017 ; Qasrawi et al., 2017 ; Yusr 2017 ; Shahin et al., 2011] souligne que la valeur client est au cœur de la TQM. Une organisation doit identifier les besoins actuels et futurs des clients et les intégrer à tous les niveaux pour améliorer la fidélisation des clients et la performance organisationnelle. La TQM repose sur l'idée que toutes les activités de l'entreprise doivent être alignées sur la satisfaction des attentes des clients. De nombreuses études [Faeq, et al., 2022 ; Dedy et al., 2016 ; Neyestani et Juanzon, 2016] soutiennent que le leadership est l'un des facteurs les plus importants qui influencent la performance d'une entreprise. Dans notre recherche le leadership arrive en deuxième position dans le diagramme de Pareto. Ce positionnement montre à quel point le rôle des dirigeants est vital dans la réussite d'une démarche TQM. Plusieurs auteurs ont lié le leadership à l'engagement de la haute direction [Ali et Johl, 2022 ; Anil et Satish, 2016 ; Yusr et al., 2017], car ce dernier fournit le cadre stratégique, les ressources et le soutien nécessaire pour intégrer la qualité au cœur de l'organisation. Ce soutien permet aux leaders de mobiliser les équipes, d'inspirer un changement de culture et de guider l'ensemble de l'entreprise vers l'excellence en matière de qualité. Le diagramme de Pareto montre que la gestion de la qualité des fournisseurs exerce une influence importante sur l'implémentation de la TQM. Elle permet de s'assurer que les fournisseurs sont alignés avec les objectifs de qualité de l'entreprise. Elle favorise également des partenariats collaboratifs et contribue à l'amélioration continue des processus. Ces éléments sont essentiels pour la réussite de la TQM. La planification stratégique garantit la cohérence entre les initiatives de qualité et les objectifs stratégiques de l'organisation. Elle veille également à ce que ces initiatives soient bien intégrées dans l'ensemble des départements de l'entreprise. De plus, elle doit être suffisamment flexible pour s'adapter aux défis émergents. Cette approche contribue à une amélioration continue de la performance organisationnelle. Les FCS liés à la gestion des ressources humaines, comme la formation et l'éducation des employés, la gestion du personnel, l'implication, la participation, le travail d'équipe et l'autonomisation, sont considérés comme « essentiels ». La formation des employés leur fournit les compétences nécessaires pour appliquer efficacement la TQM. Parallèlement, la gestion des ressources humaines implique l'élaboration de politiques visant à recruter, développer et retenir les talents, tout en alignant leurs besoins avec les objectifs de l'organisation. L'implication et l'engagement des employés encouragent une contribution proactive et renforcent la cohésion interne. Le travail en équipe améliore la collaboration, tandis que l'autonomisation, en leur accordant plus de responsabilités, favorise l'initiative et l'amélioration des processus, contribuant ainsi à la qualité et à la durabilité.

Les FCS liés à la gestion de processus considéré comme essentiel sont la gestion des processus, l'amélioration continue et l'information et analyse de la qualité. Ces FCS impliquent la surveillance et l'optimisation des différentes étapes de production et de service pour assurer une qualité constante et efficace. Ce contrôle garanti que chaque action contribue positivement aux objectifs globaux de l'organisation. La quête d'amélioration continue est indissociable de cette gestion des processus, car elle pousse l'entreprise a constamment évaluer et affiner ses pratiques pour répondre aux besoins des clients et du marché. Cette dynamique d'amélioration continue est soutenue par l'utilisation d'informations et d'analyses de qualité, qui fournissent des données précises et pertinentes pour guider les décisions stratégiques et opérationnelles.

Figure 1. Analyse de Pareto des facteurs clés de succès

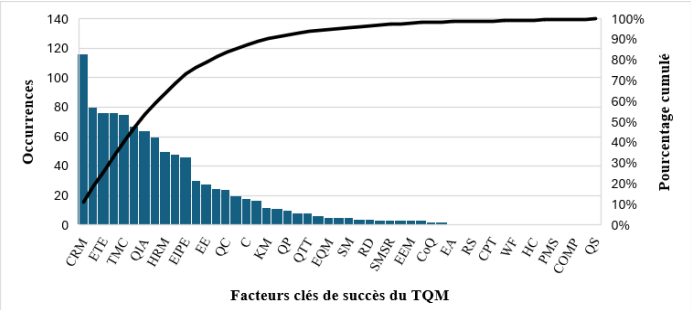


Tableau 1. Facteurs Clés de Succès de la TQM

Facteurs critiques de succès	Symbole	Occurrences	Cumulative	% d'occurrences cumulées
Gestion de la relation client	CRM	116	116	11,2%
Leadership	L	80	196	19,0%
Formation et éducation des employés	ETE	76	272	26,4%
Gestion des processus	PM	76	348	33,7%
Engagement de la haute direction	TMC	75	423	41,0%
Amélioration continue	CI	67	490	47,5%
Informations et analyses de qualité	QIA	64	554	53,7%
Gestion de la qualité des fournisseurs	SQM	60	614	59,5%
Gestion des ressources humaines	HRM	50	664	64,3%
Planification stratégique, alignement et développement	SPAD	48	712	69,0%
Implication, participation et engagement des employés	EIPE	46	758	73,4%
Travail en équipe	TW	30	788	76,4%
Responsabilisation des employés	EE	28	816	79,1%
Conception de produits et de services	PSD	25	841	81,5%
Culture de la qualité	QC	22	863	83,6%
Benchmarking	BM	20	883	85,6%
Communication	C	18	901	87,3%
Innovation produit	PI	16	917	88,9%
Gestion des connaissances	KM	12	929	90,0%
Gestion de la qualité	QM	11	940	91,1%
Assurance qualité	QA	8	948	91,9%
Outils et techniques de qualité	QTT	8	956	92,6%
Performance de qualité	QP	8	964	93,4%
Récompenses et reconnaissance	RR	6	970	94,0%
Gestion de la qualité des employés	EQM	5	975	94,5%
Confiance organisationnelle et environnement de travail	OTWE	5	980	95,0%
Gestion des parties prenantes	SM	5	985	95,4%
Utilisation du SPC (Statistical Process Control)	SPC	4	989	95,8%
Recherche et développement	RD	4	993	96,2%
Vision partagée	SV	3	996	96,5%
Marketing des services et responsabilité sociale	SMSR	3	999	96,8%
Infrastructure	INFRA	3	1002	97,1%
Encouragement et motivation des employés	EEM	3	1005	97,4%
Mentalité zéro défaut	ZDM	3	1008	97,7%
Une citoyenneté de qualité	QC	2	1010	97,9%
Le coût de la qualité	CoQ	2	1012	98,1%
Satisfaction des employés	ES	2	1014	98,3%
Politiques de qualité	QP	2	1016	98,4%
Réussite des employés	EA	1	1017	98,5%
Mettre l'accent sur le respect des exigences administratives	FOMAR	1	1018	98,6%
Recrutement et sélection	RS	1	1019	98,7%
Maintenance productive totale	TPM	1	1020	98,8%
Compensation	CPT	1	1021	98,9%
Performance des employés	EP	1	1022	99,0%
Focus sur la main-d'œuvre	WF	1	1023	99,1%
Innovation de processus	PI	1	1024	99,2%
Fabrication flexible	FM	1	1025	99,3%
Culture hiérarchique	HC	1	1026	99,4%
Changement culturel	CC	1	1027	99,5%
Compétences en gestion de projet	PMS	1	1028	99,6%
Gestion des stocks	IM	1	1029	99,7%
Compétitivité	COMP	1	1030	99,8%
Prise de décision fondée sur des faits	FBDM	1	1031	99,9%
Systèmes de qualité	QS	1	1032	100,0%
Occurrences cumulatives		**1032**		

4 LES BARRIERES DE LA TQM

Il existe diverses méthodes d'aide à la décision, chacune offrant une approche distincte pour résoudre des problématiques complexes (**Tableau 2**). Dans le cadre de notre recherche, nous avons choisi la méthode Fuzzy DEMATEL en raison du grand nombre de critères traités (50 critères) et de sa capacité à modéliser les relations causales entre ces critères. Cette méthode permet d'intégrer l'incertitude des jugements des experts grâce à la logique floue, offrant ainsi une interprétation plus flexible des évaluations subjectives. En interrogeant des experts, nous avons pu capturer leurs évaluations sous forme floue, ce qui permet de refléter de manière plus réaliste leurs perceptions et préférences. La méthode fournit également une vue claire des facteurs influents et influencés à travers une représentation graphique, ce qui facilite la priorisation stratégique et la détection de leviers d'action pour cibler les facteurs clés à optimiser.

Tableau 2. Les avantages et inconvénients des méthodes d'aide à la décision multicritère

	Avantages	Inconvénients
TOPSIS	*Introduit les notions de solution idéale et anti-idéale pour classer les alternatives.	*Suppose que les critères sont quantifiables (données cardinales). *Elle choisit la meilleure option même si toutes les alternatives sont mauvaises. L'introduction des solutions idéale et anti-idéale peut simplifier excessivement la réalité.
AHP	*Facilite la structuration d'un problème décisionnel en le décomposant selon une hiérarchie de niveaux. *s'appuie sur une échelle qualitative pour traduire les préférences du décideur en valeurs numériques comparables.	*Trop d'éléments rendent les comparaisons par paires très nombreuses. *Le classement peut changer si on ajoute ou retire des actions. *Lier une échelle numérique à une échelle sémantique crée des biais.
Fuzy Dematel	*Permet de modéliser les relations causales entre critères. Intègre l'incertitude dans les jugements via la logique floue. *Donne une vue claire des facteurs influents et influencés (graphique). *Très utile pour la priorisation stratégique et la détection de leviers.	*Demande une bonne compréhension de la logique floue. *Requiert un effort important pour les matrices et les calculs.

La méthode permet également de représenter visuellement les relations de cause à effet à travers un diagramme binaire, classifiant les facteurs en deux groupes : les causes et les effets. Cette représentation facilite la priorisation stratégique et l'identification des leviers d'action pour optimiser les facteurs clés. L'intégration de la logique floue enrichit cette approche en tenant compte des ambiguïtés dans les jugements humains, permettant aux décideurs d'évaluer plus précisément les interdépendances, même lorsque les données exactes sont difficiles à obtenir [Kuzu, 2023].

Cela se traduit par une représentation graphique claire des relations de cause à effet, appelée diagramme de causalité prépondérante, facilitant ainsi l'identification des facteurs les plus influents (**Figure 2**). Cette étape permettra une visualisation plus claire de la structure et des relations entre les barrières d'implémentation de TQM (**Tableau 3**). L'une des premières activités de cette sous-étape consiste à modéliser graphiquement les barrières. Cela se fait sur un système de coordonnées à deux axes. Cette approche permet une analyse plus fine du rôle et de l'influence de ces barrières dans le déploiement de la TQM. Cette représentation graphique aide à clarifier les relations complexes qui existent entre les différents facteurs, permettant ainsi une compréhension plus approfondie des obstacles potentiels à l'implémentation efficace de la TQM.

- L'axe horizontal de la prépondérance (R+D), représentant le score D+R (degré d'importance des facteurs), indique l'impact de chaque facteur sur l'ensemble du système. Il combine l'impact direct d'un facteur sur le système et l'influence qu'il subit des autres facteurs. En observant cet axe, les décideurs peuvent identifier les barrières qui possèdent un fort pouvoir d'influence et celles qui, en revanche, sont principalement des points d'absorption des effets des autres facteurs.
- L'axe vertical de cause/effet (R-D), représentant le score D-R (degré de cause/effet des barrières), montre la relation de cause à effet entre les facteurs. Il permet de différencier les facteurs en tant que causes prédominantes ou effets résultants, mettant en évidence ceux qui génèrent le plus de répercussions et ceux qui sont principalement réactifs. Cette distinction est cruciale pour prioriser les efforts d'amélioration et cibler les interventions stratégiques.

Nous effectuons cette démarche afin d'observer les tendances générales et les relations entre tous les programmes, à la fois simultanément et par paire. Le diagramme causal permet de rendre la complexité du problème plus compréhensible. Il facilite également la prise de décisions éclairées et stratégiques (Lin, 2013).

Figure 2. Diagramme de cause-effet

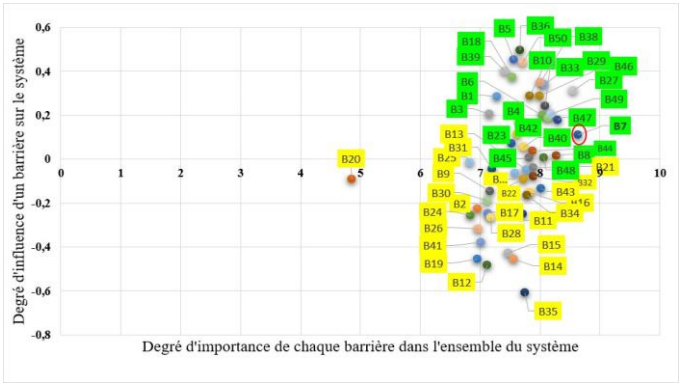


Tableau 3. Les Barrières d'implémentation de la TQM

Code	Barrières d'implémentation de TQM	Code	Barrières d'implémentation de TQM
B1	Concurrence d'autre sociétés	B26	Obstacles dû aux mentalités
B2	Manque d'implication des fournisseurs et des clients	B27	Manque de formation et d'éducation appropriées
B3	L'attitude rigide de la direction dans le TQM	B28	Adhésion des employés aux normes de qualité
B4	Manque de Leadership	B29	Déficit d'orientation vers l'innovation
B5	Manque de satisfaction client	B30	Structure organisationnelle inappropriée
B6	Mauvaise planification	B31	Absence de système d'information
B7	Manque d'engagement de la haute direction	B32	Insuffisance de ressources matérielles
B8	Mauvaise direction	B33	Manque de flexibilité organisationnelle
B9	Absence de système d'évaluation de personnels	B34	Manque de temps
B10	Manque de prise de décision participative	B35	Complexité du processus
B11	Manque d'implication des employés	B36	Accorder une faible priorité à l'amélioration de la qualité
B12	Ressources humaines négligées	B37	Bureaucratie et paperasserie
B13	Manque des personnels qualifiés	B38	Absence de liaison entre les processus
B14	Absence de motivation	B39	Manque de systèmes pour soutenir TQM
B15	Accroissement de la charge de travail	B40	L'absence de système de rétroaction
B16	Manque de responsabilisation des personnels	B41	Manque de vision à long terme
B17	Gestion inappropriée de l'autonomisation et de la synergie d'équipe	B42	L'inadéquation entre la stratégie TQM et les objectifs commerciaux
B18	Exigence de formations ciblées	B43	Manque de système d'évaluation de TQM
B19	Politique de qualité traditionnelle	B44	Attentes irréalistes
B20	Domination masculine	B45	Actions correctives inefficaces
B21	Résistance au changement	B46	Un programme de TQM injustifié
B22	Culture organisationnelle inappropriée	B47	Implémentation de TQM sans culture TQM
B23	Rotation élevée du personnel	B48	Manque de contrôle efficace des processus
B24	Déficit de crédibilité de la direction auprès des employés	B49	Ressources financiers insuffisante
B25	Diversité de la main-d'œuvre	B50	Pas de benchmarking

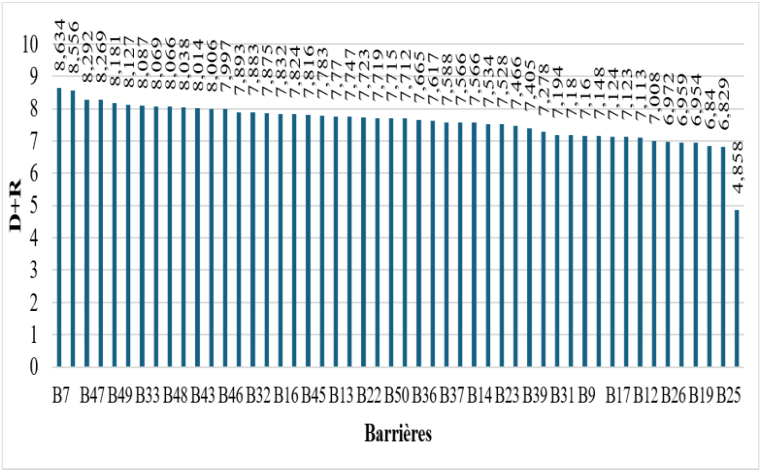
4.1 Classement des barrières sur la base du score D+R

Le vecteur horizontal (D+R) représente le degré d'importance de chaque facteur dans l'ensemble du système. En d'autres termes, (D+R) indique à la fois l'impact du facteur i sur l'ensemble du système et l'impact des autres facteurs du système sur le facteur. En termes d'importance, B7 (manque d'engagement de la haute direction) est classé en première place, suivi de B27 (manque de formation et d'éducation appropriées), etc. (**Figure 3**).

L'ordre des barrières est évalué en fonction du degré d'importance de D+R. Les valeurs identifiées d'un total de 50 barrières sur l'échelle D+R (**Figure 3**) seront utiles pour déterminer les barrières les plus importantes. Dans notre étude, la barrière B7- avec un score de 8,634- a été identifiée comme la barrière la plus importante, suivie de la barrière B27, B47 (sans culture TQM) et B8 (la mauvaise direction). Ces barrières ont un impact important sur la mise en œuvre de TQM, car leurs scores D+R sont plus élevés que ceux des autres barrières. Tandis que la barrière B20 (domination masculine) avec un score de 4.858- a été identifiée comme la barrière la moins significative.

L'analyse de la recherche révèle que le manque d'engagement de la direction est l'une des barrières les plus influentes dans l'implémentation de la TQM. Fening et Boateng-Okrah [2017], ainsi que Suleman et al. [2015], ont mis en évidence que l'absence d'implication de la haute direction représente un obstacle majeur à la réussite des démarches d'amélioration continue. Ce désengagement constitue l'une des principales causes d'échec dans la mise en œuvre de ces initiatives au sein des organisations. Ils ont également ajouté que aucun progrès n'est possible sans l'engagement de la direction et sans garantir une culture organisationnelle appropriée et favorable.

Figure 3. Priorisation des barrières en fonction de la valeur D+R



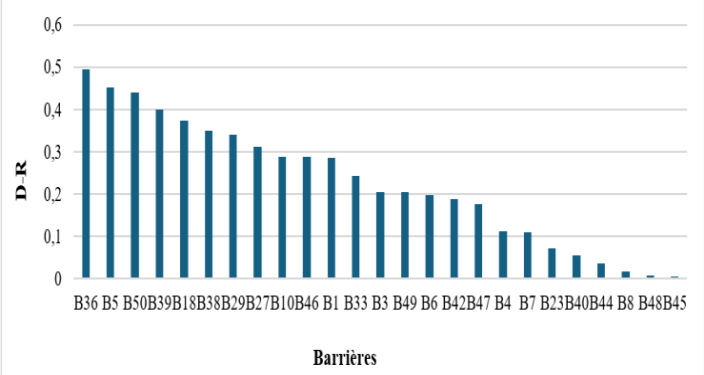
4.2 Classement des barrières en groupes de causes et groupes d'effets

Les barrières ont été classées en deux groupes (c'est-à-dire, le groupe des causes et le groupe des effets) en fonction de leurs scores de D-R (**Tableau 4**). Parmi les 50 barrières analysées, 25 présentent une valeur positive des scores de D-R. Ces barrières sont classées dans le groupe des causes. Les 25 autres qui affichent une valeur négative des scores D-R, sont classées dan le groupe des effets. Les barrières répertoriées dans le groupe des causes indiquent que la performance de ces barrières déterminera le succès de la mise en œuvre du TQM. Ces barrières influencent la mise en œuvre du TQM (**Figure 4**). Parmi toutes les barrières du groupe des causes, " Manque d'engagement de la haute direction " (B7) présente le degré le plus élevé de puissance d'impact influent avec un R égal à 4,262. Cela signifie que le manque d'engagement de la haute direction a la plus grande influence sur les autres barrières du groupe des causes.

Tableau 4. Classification des barrières en groupes de causes et groupes d'effets

Groupes de causes								Groupes d'effets							
Barrières	R	D	D-R	Barrières	R	D	D-R	Barrières	R	D	D-R	Barrières	R	D	D-R
B36	3,585	4,08	0,495	B49	3,989	4,193	0,204	B25	3,423	3,407	-0,016	B2	3,593	3,366	-0,227
B5	3,557	4,009	0,452	B6	3,92	4,118	0,198	B21	3,966	3,927	-0,039	B17	3,686	3,438	-0,247
B50	3,638	4,077	0,439	B42	3,969	4,157	0,188	B31	3,62	3,573	-0,047	B11	3,982	3,73	-0,252
B39	3,503	3,902	0,399	B47	4,058	4,234	0,176	B13	3,91	3,86	-0,05	B24	3,549	3,291	-0,258
B18	3,58	3,954	0,373	B4	3,752	3,865	0,112	B37	3,827	3,762	-0,065	B28	3,723	3,457	-0,266
B38	3,828	4,178	0,35	B7	4,262	4,371	0,109	B32	3,98	3,903	-0,078	B26	3,645	3,326	-0,319
B29	3,865	4,205	0,34	B23	3,728	3,799	0,071	B20	2,475	2,383	-0,092	B41	3,694	3,314	-0,38
B27	4,122	4,433	0,311	B40	3,832	3,887	0,055	B22	3,908	3,815	-0,092	B15	3,947	3,52	-0,427
B10	3,769	4,055	0,287	B44	3,919	3,956	0,036	B43	4,073	3,941	-0,133	B14	4,01	3,555	-0,455
B46	3,855	4,142	0,287	B8	4,126	4,142	0,016	B9	3,654	3,506	-0,147	B19	3,705	3,249	-0,456
B1	3,497	3,781	0,284	B48	4,03	4,037	0,007	B16	3,992	3,84	-0,153	B12	3,799	3,315	-0,484
B33	3,922	4,165	0,243	B45	3,91	3,91	0,01	B34	3,973	3,81	-0,164	B35	4,18	3,57	-0,61
B3	3,472	3,676	0,205					B30	3,656	3,466	-0,19				

Figure 4. Les barrières du groupe des causes basées sur la valeur D-R



Les **Tableaux 5 et 6** représentent diverses vérifications d'indicateurs pour les barrières du groupe des causes et du groupe des effets. Les barrières répertoriées dans le groupe des effets indiquent que ces barrières sont influencées par d'autres barrières (**Figure 5**). L'organisation concernée devrait se concentrer sur les barrières éminentes du groupe des causes, tels que :

❖ Accorder une faible priorité à l'amélioration de la qualité (*B36*) : Lorsque la qualité n'est pas perçue comme une priorité stratégique, les initiatives d'amélioration restent limitées, ce qui impacte négativement la compétitivité et la satisfaction des clients.

❖ Manque de satisfaction client (B5) : Une faible satisfaction des clients reflète souvent des lacunes dans les processus, les produits ou les services, ce qui peut générer un cercle vicieux de plaintes, de retours négatifs et de baisse de performance.

❖ Absence de benchmarking (B50) : L'absence de comparaison avec les meilleures pratiques du secteur empêche l'organisation d'identifier ces points faibles et d'adopter des stratégies d'amélioration efficaces.

❖ De manière similaire, les barrières éminentes du groupe des effets sont celles qui subissent fortement l'influence des autres barrières et qui traduisent les conséquences directes d'un environnement organisationnel défaillant. Parmi celles-ci, on retrouve :

❖ Complexité du processus (B35) : Des processus trop complexes, mal définis ou inefficaces peuvent ralentir les opérations, générer des erreurs et accroître la résistance au changement.

❖ Ressources humaines négligées (B12) : Une gestion inadéquate du personnel, marquée par un manque de formation, de motivation ou de reconnaissance, peut réduire la performance

globale de l'organisation et limiter l'adhésion aux démarches de qualité.

❖ Politique de qualité traditionnelle (B19) : Une approche rigide et dépassée de la gestion de la qualité, fondée sur des principes obsolètes, peut freiner l'innovation et l'adoption de nouvelles méthodes plus efficaces.

L'analyse de ces barrières et de leurs interactions permet à l'organisation de se concentrer sur l'éradication des causes profondes plutôt que sur la gestion des symptômes. Une stratégie ciblée, basée sur l'identification et la réduction des barrières les plus influentes, peut améliorer considérablement la mise en œuvre de la TQM et accroître la performance globale de l'entreprise.

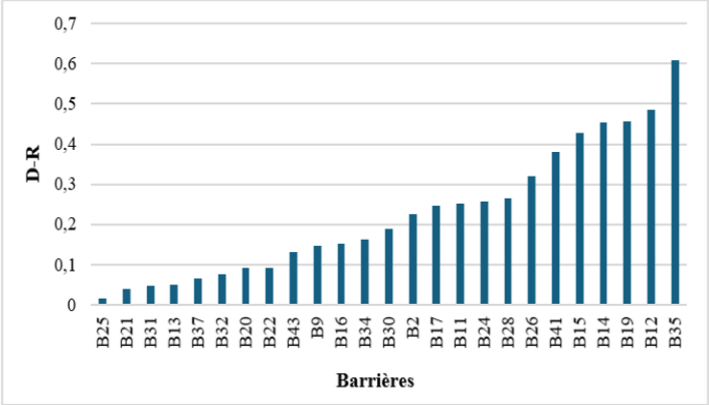
Tableau 5. Description de la barrière du groupe des causes

Nr°	Vérification des indicateurs	Descriptions
1	Le plus haut degré de puissance d'impact influente R	**B35** : Complexité du processus présente le degré le plus élevé de puissance d'impact influent avec un R de 4,178. La barrière B35 a l'effet le plus négatif sur la mise en œuvre du TQM.
2	Score D-R le plus élevé du groupe	B25 : Diversité de la main-d'œuvre présente la valeur la plus élevée du score D-R, égale à moins 0,016, ce qui signifie qu'elle est fortement influencée par toutes les autres barrières.
3	Score D-R le plus bas	**B35** : Complexité du processus présente la plus faible valeur du score D-R, égale à moins - 0,608, ce qui signifie que la barrière B35 est le moins influencé par les autres facilitateurs.
4	Score D+R le plus élevé	**B43** : Manque de système d'évaluation de TQM ont présente la valeur la plus élevée du score D+R, égale à 8,014, ce qui signifie que cette barrière B43 est la plus importante par rapport aux autres barrières.

Tableau 6. Description de la barrière du groupe des effets

Nr°	Vérification des indicateurs	Descriptions
1	Le plus haut degré de puissance d'impact influente R	**B7** : Manque d'engagement de la haute direction possède le plus haut degré de puissance d'impact influent, avec un R de 4,262, indiquant ainsi que le barrière B7 exerce une influence considérable sur les autres barrières du groupe.
2	Score D-R le plus élevé du groupe	**B36** : Accorder une faible priorité à l'amélioration de la qualité présente la valeur la plus élevée du score D-R, égale à 0,495, ce qui indique que B36 est le moins influencé par toutes les autres barrières.
3	Score D-R le plus bas	**B45** : Actions correctives inefficaces et pas de connaissance du coût de la mauvaise qualité présente la plus faible valeur du score D-R, égale à 0,005, ce qui signifie que le barrière B45 est fortement influencé par les autres barrières.
4	Score D+R le plus élevé	**B7** : Manque d'engagement de la haute direction présente le score D+R le plus élevé, égal à 8,634. Cette barrière a le potentiel d'améliorer le système et nécessite l'attention de la direction.

Figure 5. Les barrières du groupe des effets basés sur la valeur D-R (Valeurs négatifs)



4.3 Analyse de sensibilité des résultats

L'analyse de sensibilité évalue l'impact des variations des poids des critères sur les résultats d'évaluation, identifiant les critères les plus sensibles. À travers plusieurs scénarios, cette analyse permet de vérifier si de petits changements entraînent des variations significatives. La méthode Fuzzy DEMATEL est utilisée pour examiner l'impact des variations des poids sur l'implémentation de la TQM.

Pour ce faire, nous mettons en œuvre la méthode Fuzzy DEMATEL au cours de vingt expériences, en modifiant les poids des critères d'évaluation à chaque scénario. Cela nous permet d'examiner l'impact des variations des poids des critères d'évaluation sur la barrière d'implémentation de la TQM. Selon les résultats obtenus nous avons constaté que :

- Le barrière B7 : Manque d'engagement de la haute direction se positionne comme la barrière la plus significative à l'échelle globale du système, quel que soit le scénario considéré.
- La répartition des barrières B7, B27, B47, B8, B49, B42, B33, B29, B48, B6, B43, B38, B46, B10, B45, B35, B22, B40, B50, B11, B36, B4, B37, B15, B39, B1, B31, B28, B9, B3, B41, B26, B24, B25 et B20 est constante dans tous les scénarios.

Les résultats montrent que le classement des facteurs de cause et d'effet demeure inchangé dans tous les scénarios. L'analyse de sensibilité a démontré des résultats robustes et valides, proches des préférences réelles des évaluateurs consultés.

5 CONCLUSION

Cette étude a identifié et priorisé les principaux FCS ainsi que les barrières à la mise en œuvre efficace de la TQM. Cette priorisation nous a permis de distinguer les FCS les plus influents pour assurer une application réussie de la TQM, tout en tenant compte des obstacles rencontrés. En comprenant l'importance relative de ces barrières, il devient possible d'orienter plus efficacement les actions futures afin d'en atténuer les effets et de lever progressivement les freins identifiés. Dans cette perspective, notre démarche ne se limite pas à l'amélioration de la performance organisationnelle, mais vise à inscrire la TQM dans une logique de durabilité à long terme. Pour ce faire, nous proposons de combiner les FCS avec les Objectifs de Développement Durable (ODD), dans le but de définir de nouveaux axes d'action regroupés sous le concept de Green TQM. Cette stratégie novatrice ambitionne d'unir la recherche de qualité à la responsabilité environnementale, en intégrant les principes du développement durable dans les pratiques de gestion de la qualité.

6 REFERENCES

Aamer, A. M., Al-Awlaqi, M. A., & Alkibsi, S. M. (2017). TQM implementation in a least developed country: An exploratory study of Yemen. The TQM Journal, 29(3), 467-487.

Al-Ababneh, M. M. A. (2011). An exploration of the effect of total quality management implementation on organisational creativity in Jordanian resort hotels (Doctoral dissertation). University of Surrey.

Ali, K., Johl, S. K., Muneer, A., Alwadain, A., & Ali, R. F. (2022). Soft and hard Total Quality Management practices promote Industry 4.0 readiness: A SEM-neural network approach. Sustainability, 14, 11917.

Alzoubi, H., & Ahmed, G. (2019). Do TQM practices improve organisational success? A case study of electronics industry in the UAE. International Journal of Economics and Business Research, 17(4), 459-472.

Anil, A. P., & Satish, K. P. (2016). Investigating the relationship between TQM practices and firm's performance: A conceptual framework for Indian organizations. Procedia Technology, 24, 554-561.

Dedy, A. N., Zakuan, N., Bahari, A. Z., Ariff, M. S. M., Chin, T. A., & Saman, M. Z. M. (2016). Identifying critical success factors for TQM and employee performance in Malaysian automotive industry: A literature review. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 131(1), 012016.

Enquist, B., Johnson, M., & Rönnbäck, A. (2015). The paradigm shift to business excellence 2.0. International Journal of Quality and Service Sciences, 7(2/3), 321-333.

Faeq, D. K., Ali, B. J., & Akoi, S. (2022). The impact of people-related TQM and CSR on employees' job satisfaction. UKH Journal of Social Sciences, 6(1), 1-9.

Fening, F. A., & Boateng-Okrah, E. (2017). TQM implementation concepts and tools/techniques.

Hietschold, N., Reinhardt, R., & Gurtner, S. (2014). Measuring critical success factors of TQM implementation successfully – A systematic literature review. International Journal of Production Research, 52, 6254-6272.

Kuzu, A. C. (2023). Application of fuzzy DEMATEL approach in maritime transportation: A risk analysis of anchor loss. Ocean Engineering, 273, 113786.

Lau, R. S. M., & Anderson, C. A. (1998). A three-dimensional perspective of total quality management. International Journal of Quality & Reliability Management, 15(1), 85-98.

Lin, W. (2013). Agnostic notes on regression adjustments to experimental data: Reexamining Freedman's critique. Annals of Applied Statistics, 7(1), 295–318.

Martínez-Lorente, A. R., Dewhurst, F., & Dale, B. G. (1998). Total quality management: Origins and evolution of the term. The TQM Magazine, 10, 378-386.

Muruganantham, G., Vinodh, S., Arun, C. S., & Ramesh, K. (2018). Application of interpretive structural modelling for analysing barriers to total quality management practices implementation in the automotive sector. Total Quality Management & Business Excellence, 29(5-6), 524-545.

Ndihokubwayo, R., Simpeh, F., & Akinlolu, M. (2019). TQM maintenance department of an institution of higher learning. implementation challenges: A case study of a building International Journal of Productivity and Quality Management, 1(1), 1.

Neyestani, B., & Juanzon, J. B. P. (2016). Identification of a set of appropriate critical success factors for successful TQM implementation in construction, and other industries. International Journal of Advanced Research, 4(11), 1581-1591.

Ooi, K. B., Bakar, N. A., Arumugam, V., Vellapan, L., & Loke, A. K. Y. (2007). Does TQM influence employees' job satisfaction? An empirical case analysis. International Journal of Quality & Reliability Management, 24(1), 62-77.

International Journal of Quality and Reliability Management, 34(7), 1034-1055.

Saleh, R. A., Sweis, R. J., Saleh, F. I. M., Sarea, A. M., Mahmoud, I., Eldin, S., & Obeid, D. N. (2018). Linking soft and hard total quality management practices: Evidence from Jordan. International Journal of Business Excellence, 14(1).

Pradhan, B. L. (2017). Confirmatory factor analysis of TQM implementation constructs: Evidence from Nepalese manufacturing industries. Management Review: An International Journal, 12(1), 26-56.

Qasrawi, B. T., Almahamid, S. M., & Qasrawi, S. T. (2017). The impact of TQM practices and KM processes on organisational performance: An empirical investigation.

Shahin, A., Abandi, A. A., & Javadi, M. H. M. (2011). Analyzing the relationship between customer satisfaction and loyalty in the software industry with a case study in Isfahan system group. International Journal of Business and Social Science, 2(23), 129-136.

Sila, I., & Ebrahimpour, M. (2003). Examination and comparison of the critical factors of total quality management (TQM) across countries. International Journal of Production Research, 41(2), 235-268.

Suleman, Q., Gul, R., & Scholar, M. P. (2015). Journal of Education and Practice. www.iiste.org ISSN.

Talapatra, S., & Uddin, M. K. (2019). Prioritizing the barriers of TQM implementation from the perspective of garment sector in developing countries. Benchmarking, 26(7), 2205-2224.

Talib, F., & Rahman, Z. (2015). Identification and prioritization of barriers to total quality management implementation in service industry: An analytic hierarchy process approach. The TQM Journal, 27(5), 591-615.

Yusr, M. M., Mokhtar, S. S. M., Othman, A. R., & Sulaiman, Y. (2017). Does interaction between TQM practices and knowledge management processes enhance the innovation performance? International Journal of Quality & Reliability Management, 34(7), 955-974.

W. Edwards Deming (1900-1993), Davids, M. (1999): Quality controller. Journal of Business Strategy, 20, 31-32.

Diagnostic vibratoire des Roulements basé sur le Fast Kurtogram et la Transformée en Ondelettes Continues

FARES SADJI[1], RACHID NOUREDDINE[2], REDA YAHIAOUI[3], NASSIM BOUDAOUD[4], HAI CANH VU[5]

[1] Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle
Laboratoire Génie de Production et Maintenance Industrielle
31000, Oran, Algérie
sadji.fares@univ-oran2.dz

[2] Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle
Laboratoire Génie de Production et Maintenance Industrielle
31000, Oran, Algérie
rachid.noureddine@univ-oran2.dz

[3] Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle
Laboratoire Génie de Production et Maintenance Industrielle
31000, Oran, Algérie
reda.yahiaoui@univ-oran2.dz

[4] Université de Technologie de Compiègne
Laboratoire Roberval
60203 Compiègne Cedex, France
nassim.boudaoud@utc.fr

[5] Université de Technologie de Compiègne
Laboratoire Roberval
60203 Compiègne Cedex, France
hai-canh.vu@utc.fr

Résumé –

Résumé – Les roulements sont des composants clés dans de nombreuses installations mécaniques et le diagnostic de leurs états de santé est essentiel dans le cadre de la maintenance prédictive. L'objectif de ce travail est de proposer une approche de diagnostic vibratoire basée sur une combinaison de deux techniques de traitement du signal : le Fast Kurtogram (FK) et la Transformée en Ondelettes Continues (CWT). Le processus de l'approche proposée comprend d'une part, la Décomposition des Modes Empiriques (EMD), le prétraitement des données par FK et CWT, l'extraction des caractéristiques dans trois domaines (temporel ; fréquentiel ; temps-fréquence). Et d'autre part, la classification de l'état des roulements, par trois algorithmes d'apprentissage automatique permettant d'évaluer la robustesse de la méthode FK-CWT proposée. Afin de valider notre approche, les résultats obtenus ont été confrontés à ceux récemment rapportés dans la littérature.

Abstract – Bearings are key components in many mechanical systems and diagnosing their health status is essential for predictive maintenance. The objective of this work is to propose a vibration diagnosis approach based on a combination of two signal processing techniques: Fast Kurtogram (FK) and Continuous Wavelet Transform (CWT). The process of the proposed approach successively includes Empirical Mode Decomposition (EMD), data preprocessing using the Fast Kurtogram (FK) and the Continuous Wavelet Transform (CWT), feature extraction in three domains (time; frequency; time-frequency). And on the other hand, the classification of the bearings condition, by three machine learning algorithms to evaluate the robustness of the proposed FK-CWT method. In order to validate our approach, the results obtained were compared with those recently reported in the literature.

***Mots clés* - Maintenance prédictive, Diagnostic, Analyse vibratoire, Kurtogram, Transformée en Ondelettes Continues.**
***Keywords* – Predictive maintenance, Diagnosis, Vibration analysis, Kurtogram, Continuous Wavelet Transform.**

1 INTRODUCTION

Dans un environnement économique en constante évolution, la concurrence pousse les industriels à optimiser les performances de leurs moyens de production afin de répondre aux exigences des clients. La maintenance, en raison de son impact direct sur la disponibilité et la fiabilité des équipements, est devenue un levier stratégique incontournable. Dans le cadre de l'industrie

X.0, la maintenance prédictive joue un rôle clé, permettant d'optimiser les interventions et de les réaliser au moment opportun, avec pour objectif final d'assurer la qualité des produits et de maximiser la disponibilité des équipements.

La maintenance prédictive a pour but de détecter précocement toutes anomalies et d'éviter ainsi d'éventuelles défaillances majeures. Elle repose sur 3 étapes essentielles de surveillance : la détection, le diagnostic, et le pronostic. Dans le cadre des machines tournantes, qui occupent une place prépondérante dans l'industrie, la méthode reconnue la plus efficace pour les étapes de détection-diagnostic est l'analyse vibratoire. L'évolution des niveaux vibratoires des machines tournantes fournit des informations essentielles sur leurs états de santé. Parmi les causes les plus fréquentes de défaillance, les roulements sont les plus incriminés. Les études montrent que 40 % des pannes dans les grandes machines et jusqu'à 90 % dans les plus petites sont dues à des défauts de roulements [Thorsen, 1995].

Les défaillances de roulements peuvent survenir lors de la fabrication, du montage ou après une certaine période d'exploitation, entraînant des pertes financières et, dans certains cas, des risques pour la sécurité [Nishat Toma & Kim, 2020]. L'anticipation de ces défaillances et le remplacement prédictif des roulements mis en cause permet d'éviter des dommages significatifs aux machines ainsi que de réduire efficacement les coûts de maintenance et les dépenses en capital. Dans ce contexte, afin de mesurer les signaux vibratoires, différents types d'accéléromètres sont couramment utilisés pour surveiller et évaluer l'état de santé des roulements [Abburi et al., 2023]. Ces signaux renferment une quantité importante d'informations exploitables moyennant des techniques avancées de traitement du signal [Lei et al., 2007].

L'analyse d'enveloppe, axée sur les signaux large bande haute fréquence caractéristiques des roulements, est largement employée pour la détection des défauts, car elle permet de réduire l'impact des interférences dans la bande de fréquence analysée [Lei et al., 2011]. Antoni et Randall [Antoni & Randall, 2006] ont réalisé une étude approfondie sur le Spectre de Kurtosis (SK), tandis que le Kurtogram a été introduit par Antoni [Antoni, 2007]. Cette approche a été généralisée afin de mieux s'adapter aux signaux non stationnaires. Grâce à sa capacité à extraire les composantes transitoires masquées dans des signaux bruités, le Kurtogram s'est imposé comme un outil puissant pour le diagnostic des défauts mécaniques.

L'amélioration du Kurtogram par l'intégration de la transformée de Fourier à court terme (STFT : Short-Time Fourier Transform) ou de filtres à réponse impulsionnelle finie (FIR : Finite Impulse Response) a renforcé sa capacité à extraire les caractéristiques transitoires et à identifier les défauts [Lei et al., 2011]. Ces évolutions ont conduit à une adoption croissante du Kurtogram dans le prétraitement des données. Par exemple, [Geng et al., 2020] ont utilisé cette technique pour renforcer la robustesse du diagnostic face aux variations des conditions de fonctionnement et au bruit. De même, [Afia et al., 2018] ont comparé leur approche au Fast Kurtogram pour le diagnostic des défauts de boîtes de vitesses à partir de signaux vibratoires expérimentaux. Une variante du Kurtogram, intégrant la décomposition en paquets d'ondelettes (WPD : Wavelet Packet Decomposition) comme filtre, a été proposée pour surmonter certaines limitations du modèle original [Lei et al., 2011].

Parmi les différentes techniques de prétraitement des données, plusieurs études récentes ont démontré l'efficacité de la WPD pour améliorer la robustesse du diagnostic et réduire le bruit des signaux [Aburakhia et al., 2022 ; Lourari et al., 2024]. De plus, [Boudiaf et al., 2024] ont exploité la Transformée en Ondelettes Continues (CWT : Continuous Wavelet Transform) pour diagnostiquer les défauts des roulements dans les moteurs à induction. La CWT permet de convertir les signaux vibratoires unidimensionnels en représentations temps-fréquence bidimensionnelles (scalogrammes), facilitant ainsi la détection des défauts. Une comparaison entre différentes fonctions d'ondelettes (Morse, Morlet et Bump) a également été menée afin d'évaluer leur efficacité dans le diagnostic.

Dans la suite de cet article, nous nous intéressons aux techniques du Fast Kurtogram et de la Transformée en Ondelettes Continues. La section suivante décrit la méthodologie et l'approche de diagnostic adoptée. La troisième section présente la base de données utilisée, tandis que la quatrième section est consacrée à l'analyse et à l'interprétation des résultats obtenus. Enfin, une conclusion et des perspectives de recherche viennent clore ce travail.

2 METHODOLOGIE

L'approche que nous proposons pour le diagnostic prédictif de l'état des roulements repose sur deux phases essentielles. Une première phase, de traitement du signal vibratoire, pour extraire les caractéristiques, en utilisant la Décomposition des Modes Empiriques (EMD : Empirical Mode Decomposition), le Fast Kurtogram (FK) et la Transformée en Ondelettes Continues (CWT). Cette combinaison de techniques nous permet d'analyser en détail les signaux vibratoires dans trois domaines : temporel, fréquentiel et temps-fréquence. La seconde phase, pour la classification de l'état des roulements, en implémentant et confrontant trois algorithmes d'apprentissage automatique (Naïve Bayes - NB, Decision Tree - DT et Random Forest - RF). Le cadre général de cette approche est illustré à la Figure 1.

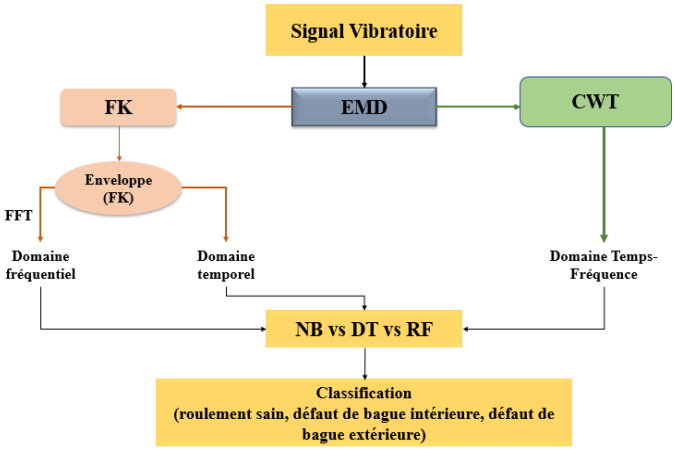


Figure 1. Méthodologie de diagnostic proposé

2.1 Décomposition des Modes Empiriques

La Décomposition des Modes Empiriques (EMD : Empirical Mode Decomposition) est une technique d'analyse de signal linéaire qui décompose les signaux vibratoires en une série de composantes pour différentes fréquences. Ces composantes sont appelées fonctions de modes intrinsèques (IMF : Intrinsic Mode Functions).

Dans cette technique, tout signal complexe est décomposé en une partie résiduelle et plusieurs fonctions de modes intrinsèques (IMF) multi-échelles [Manjunatha & Chittappa, 2022]. Chaque IMF est désignée par une fonction et doit satisfaire aux deux conditions ci-dessous :

1. Les différences dans le nombre de maxima et de passages à zéro doivent être inférieures ou égales à un.
2. La moyenne des enveloppes des valeurs maximales et minimales dans tout intervalle des composantes doit être égale à zéro.

2.2 Prétraitement des données

Après la décomposition, les fonctions de mode intrinsèque (IMFs) sont utilisées comme entrées, d'une part pour le Fast Kurtogram (FK) et d'autre part pour la Transformée en Ondelettes Continues (CWT), afin d'extraire des caractéristiques dans trois domaines : temporel, fréquentiel et temps-fréquence.

2.2.1 Fast Kurtogram

Le Fast Kurtogram est une version optimisée du Kurtogram, conçu pour réduire le temps de calcul. Le FK détermine la bande de fréquence ayant le Kurtosis Spectrale (SK : Spectral Kurtosis) maximale.

Le Kurtosis permet de détecter les défauts impulsifs liés aux machines rotatives en mesurant l'aplatissement des données du signal. Le SK est une mesure qui évalue le kurtosis et indique comment l'impulsivité d'un signal varie en fonction de la fréquence. Il est connu que, les défauts associés aux roulements engendrent des impulsions modulées. La valeur du SK est obtenue en calculant le kurtosis pour chaque bande de fréquence afin d'extraire ses composantes impulsives et non stationnaires, puis d'identifier leur emplacement dans le domaine fréquentiel, comme exprimé dans [Afia et al., 2018] :

$$K_{*}(f) = \frac{\langle |H(t,f)|^4 \rangle}{\langle |H(t,f)|^2 \rangle^2} - 2 \qquad (1)$$

$H(t,f)$ représente l'enveloppe complexe temps-fréquence du signal filtré, et elle est calculée avec une transformée de Fourier à court terme ; et < > est l'opérateur de moyenne.

Le Kurtosis Spectrale sera élevée dans les fenêtres fréquentielles où le signal de défaut est dominant.

Le Fast Kurtogram, proposé par Antoni [Antoni, 2007], est un algorithme permettant de calculer le Kurtogram rapidement. Grâce à ses avantages pour détecter, caractériser et localiser les signaux transitoires cachés dans des signaux, le Fast Kurtogram se révélé être un outil efficace et pratique pour le diagnostic. A titre d'exemple, lors de l'utilisation de l'analyse d'enveloppe pour un diagnostic des défauts de machines rotatives, la fréquence centrale et la largeur de bande du filtre passe-bande optimal peuvent être déterminées à l'aide du Fast Kurtogram.

La Figure 2, exemple que nous avons extrait de notre étude de cas, illustre l'image typique d'un Fast Kurtogram. Son graphique est utilisé pour afficher les valeurs de kurtosis spectrale (SK) dans différentes bandes de fréquence dans le domaine fréquentiel.

Dans cette figure du Fast Kurtogram :

- Chaque bloc coloré représente une bande de fréquence.
- La couleur du bloc représente la valeur de SK de cette bande de fréquence (Bw).
- La largeur du bloc correspond à la largeur de bande.
- La position du bloc sur l'axe des abscisses indique la fréquence centrale (fc).
- Le bloc avec la valeur de SK la plus élevée indique les paramètres du filtre passe-bande optimal.

Une fois ces paramètres déterminés, l'analyse d'enveloppe avec ce filtre est utilisée pour réaliser le diagnostic.

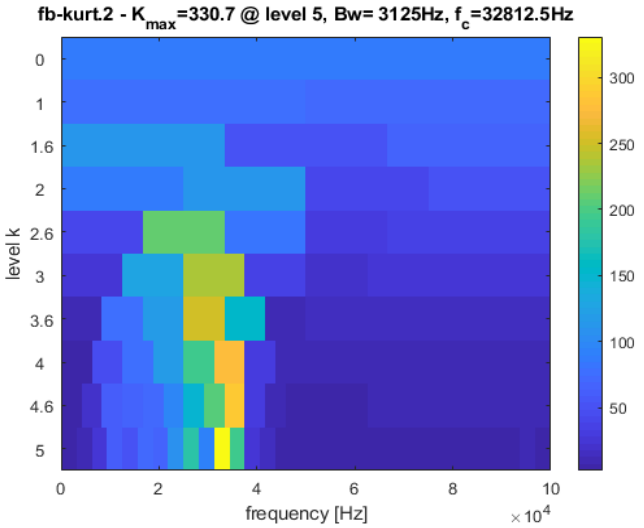


Figure 2. Exemple de Fast Kurtogram

2.2.2 Transformée en Ondelettes Continues

La Transformée en Ondelettes Continues (CWT : Continuous Wavelet Transform) est une technique mathématique utilisée pour analyser les signaux non stationnaires, c'est-à-dire les signaux dont les caractéristiques de fréquence changent au fil du temps. Elle permet de transformer un signal du domaine temporel au domaine temps-fréquence à l'aide de fonctions ondelettes de tailles et de positions variables, et génère des coefficients caractérisant le contenu fréquentiel du signal au fil du temps.

La CWT est définie mathématiquement par l'équation :

$$C(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot \psi_{a,b}^{*}(t) dt \qquad (2)$$

x(t) représente le signal vibratoire ;

$\psi_{a,b}(t)$: représente la fonction ondelettes avec l'échelle a et le décalage de position b (Version étirée et translatée de l'ondelette mère) ;

ψ^{*} est le conjugué complexe de ψ ;

C(a, b) est le coefficient CWT qui représente l'amplitude et la phase d'une fréquence associée à a au moment b.

Grâce à cette équation, le signal x(t) est décomposé en une série de coefficients d'ondelettes. Ces coefficients peuvent être visualisés à l'aide d'un scalogramme 2D où l'axe des x représente le temps écoulé et l'axe des y représente l'échelle écoulée ou la fréquence. L'intensité de la couleur représente l'amplitude du coefficient d'ondelette, mettant en évidence l'énergie ou la puissance du signal à des points de temps et d'échelle spécifiques. Nous avons choisi d'utiliser la CWT dans notre approche en raison de sa capacité supérieure à analyser les signaux non stationnaires.

2.3 Extraction de caractéristiques

La phase d'extraction de caractéristiques est essentielle pour l'évaluation de la dégradation, car le signal vibratoire des roulements contient une riche quantité d'informations cachées. De nombreuses caractéristiques du domaine temporel et fréquentiel peuvent être utilisées pour explorer la relation entre l'état de fonctionnement des roulements et les signaux vibratoires.

Parmi ces caractéristiques, le RMS (Root Mean Square) et kurtosis sont les plus couramment utilisés, car elles reflètent efficacement les changements en temps réel des vibrations du roulement. Cependant, les fluctuations dues à l'incertitude des vibrations influencent grandement l'estimation de la dégradation des roulements. Par conséquent, un traitement supplémentaire des caractéristiques traditionnelles, comme la fusion des caractéristiques ou l'analyse statistique, est nécessaire pour trouver un bon indicateur [Zhang et al., 2019].

Dans ce travail, 10 indicateurs du domaine Temporel, et 6 indicateurs du domaine Fréquentiel, 3 indicateurs du domaine Temps-Fréquence sont extraits pour une analyse approfondie.

- Domaine temporal: Skewness, Kurtosis, STD (standard deviation), RMS (Root mean square), Variance, Shape Factor (Facteur de forme), Kmax (Paramètre de fast kurtogram), Minimum value, Maximum value, Mean value.
- Domaine fréquentiel: Bw (Paramètre de fast kurtogram), fc (Paramètre de fast kurtogram), SFDR (Spurious-Free Dynamic Range), SNR (Signal-to-Noise Ratio), Minimum value, Maximum value.
- Domaine Temps-Fréquence : Energy, Entropy, Ratio.

3 BASE DE DONNEES

La base de données open source « Bearing Vibration Data under Time-varying Rotational Speed Conditions » (Huang & Baddour, 2018), constitue une ressource intéressante pour le diagnostic vibratoire des roulements, permettant d'étudier différents types de défauts sous des conditions variées de vitesse.

Les données que nous avons utilisés dans ce travail proviennent de cette base et ont été collectées au sein du Département de Génie Mécanique de l'Université d'Ottawa, à l'aide du simulateur de défauts mécaniques Spectra Quest Machinery Fault Simulator [Huang & Baddour, 2018]. Ce banc d'essai est conçu pour simuler différents états de fonctionnement des roulements sous des conditions variées comprenant les mesures vibratoires et des variations de vitesse. Il est équipé d'un moteur électrique qui entraîne la rotation d'un arbre supporté par deux roulements : un roulement sain du côté moteur et un roulement expérimental du côté opposé, où différents niveaux de défauts sont introduits. Les données sont capturées à l'aide d'un accéléromètre pour mesurer les vibrations, et un codeur incrémental pour suivre la vitesse de rotation. Les signaux sont enregistrés à une fréquence d'échantillonnage élevée de 200 000 Hz, ce qui garantit une capture précise des détails des vibrations. Chaque acquisition dure 10 secondes et est stockée dans des fichiers .mat contenant deux canaux : les données vibratoires dans Channel_1 et les données de vitesse de rotation dans le Channel_2.

Les conditions expérimentales incluent deux variables principales : l'état de santé du roulement et la variation de vitesse. Les données sont collectées pour des roulements sains, des roulements présentant un défaut sur la bague intérieure et des roulements avec un défaut sur la bague extérieure. Pour chaque type de roulement, la vitesse varie de quatre façons : vitesse croissante, vitesse décroissante, vitesse croissante suivie de décroissante, et vitesse décroissante suivie de croissante. Ces conditions sont testées trois fois chacune, générant un total de 36 ensembles de données.

4 RESULTATS ET DISCUSSION

Ces ensembles de données ont utilisés dans ce travail pour évaluer les performances du modèle de diagnostic proposé. Tout d'abord on a décomposé le signal vibratoire en plusieurs segments dans le but d'extraire les caractéristiques par segment qui est utile pour le traitement de signaux de grande taille. Les données sont composées de 3 états du roulement avec 4 conditions de vitesse et pour chaque vitesse 3 essais : donc 36 signaux ; après la décomposition sur 100 on trouve 3600 sous-signaux (c'est une cellule de 3600).

Ensuite on a utilisé l'EMD pour une décomposition par colonne et obtenir les IMFs de chaque sous-signaux. Ces IMFs sont des composantes oscillatoires obtenues à partir du signal d'entrée (cf. Figure 3). La sortie est une cellule où chaque colonne représente une IMF (dans notre cas on a 7 colonnes ou 7 IMF c.à.d. 7 décompositions).

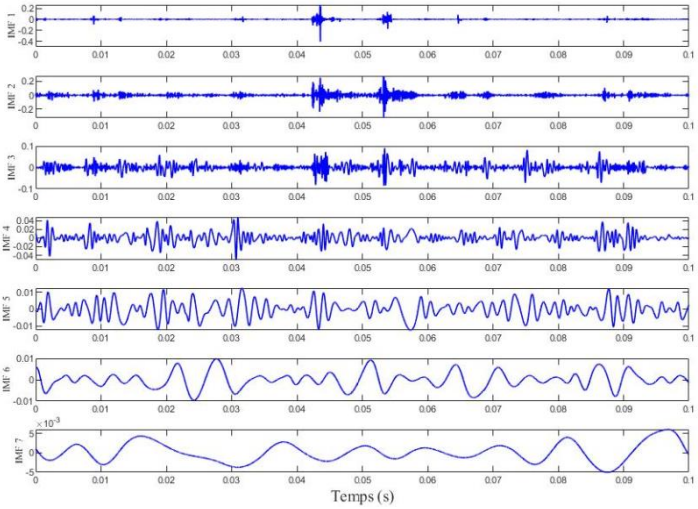


Figure 3 Les IMF obtenu par EMD

Cette décomposition permet d'isoler et d'analyser plus facilement les composantes caractéristiques du signal pour un diagnostic plus précis. Les premières IMFs 1, 2 et 3 contiennent les hautes fréquences, souvent associées à du bruit ou à des défauts localisés tels que des chocs. Les IMFs 4 et 5 contiennent les moyennes fréquences. Les dernières IMFs 6 et 7 correspondent aux basses fréquences, représentant la tendance globale du signal. On peut constater qu'il n'est pas possible de détecter une défaillance du roulement uniquement en observant la forme d'onde, car les impulsions de défaut sont masquées par le bruit. Pour surmonter ce problème, on a appliqué le FK et CWT sur les IMFs avec une fréquence d'échantillonnage de 200 kHz.

4.1 Tendances des coefficients CWT

Les 3 Figures 4, 5, 6 montrent l'évolution des coefficients CWT, pour les trois cas étudiés : roulement sain, défaut de bague extérieure, et défaut de bague intérieure.

Pour le roulement sain (cf. Figure 4) les valeurs d'amplitudes des coefficients CWT sont inférieur à 0.018 ; ces valeurs sont sensiblement faibles et réparties de manière homogène indiquant qu'il n'y a pas d'excitations significatives liées à des défauts localisés.

Pour le défaut de la bague extérieure (cf. Figure 5) on constate des valeurs extrêmes de ces coefficients à plus de 0.02. Ces pics correspondent à des échelles (ou des bandes de fréquence) où les vibrations sont amplifiées.

Pour le défaut de la bague intérieure (cf. Figure 6) la tendance des coefficients présente des amplitudes encore plus élevées que dans le cas du défaut de la bague extérieure.

Ces 3 figures montrent que les coefficients CWT permettent une discrimination entre un roulement sain et des roulements défectueux. Ces résultats soulignent l'efficacité de la CWT pour

extraire des signatures vibratoires liées à des défauts.

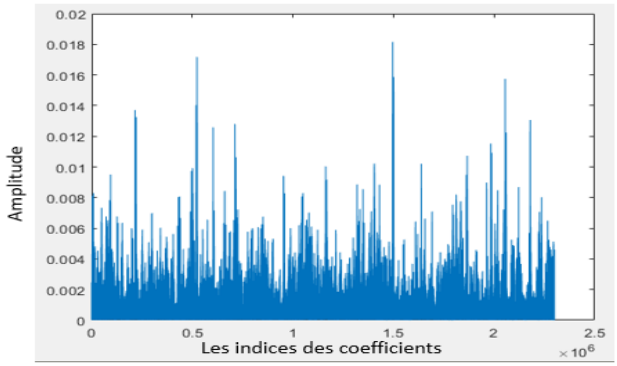


Figure 4. Coefficients CWT - Roulement sain

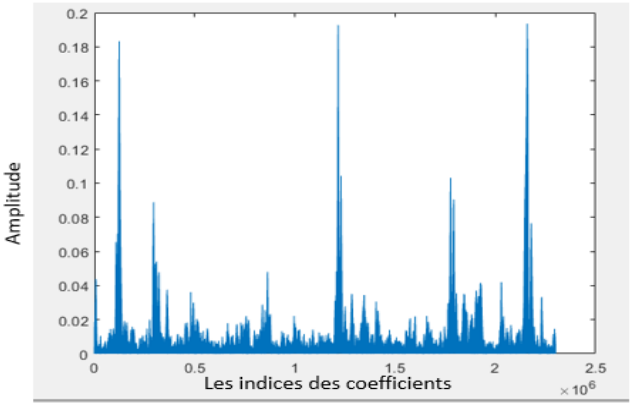


Figure 5. Coefficients CWT - Défaut de bague intérieure

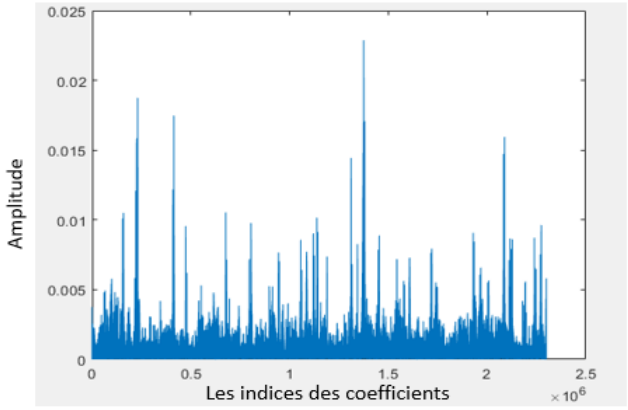


Figure 6. Coefficients CWT - Défaut de la bague extérieure

4.2 Enveloppe du FK

Les Figures 7, 8, 9 représentent l'enveloppe du signal filtré du FK en domaine temporal.

Pour le roulement sain (cf. Figure 7) le signal présente une distribution homogène avec de faibles amplitudes (max < $1{,}4.10^{-3}$) : Dans un roulement sain, n'y a pas de pics dominants, les vibrations sont principalement dues aux fluctuations normales, comme le frottement ou le bruit ambiant.

Pour le défaut de la bague intérieure (cf. Figure 8) des pics prononcés (entre $2{,}5.10^{-3}$ et 3.10^{-3}) apparaissent à des instants spécifiques, correspondant aux impacts ou anomalies causées par un défaut sur la bague intérieure. Ces impacts produisent des modulations significatives dans l'enveloppe, ce qui est un indicateur d'un comportement anormal.

Pour le défaut de la bague extérieure (cf. Figure 9) le signal montre des pics irréguliers (max < $1{,}6.10^{-3}$), mais leur distribution temporelle est différente de celle de la bague intérieure. Les pics traduisent une signature vibratoire caractéristique d'un défaut localisé sur la bague extérieure.

Sur ces 3 figures d'enveloppe du FK, on observe aussi clairement la tendance vibratoire entre le roulement sain et les roulements défectueux. Les pics élevés dans les cas de défauts (bague intérieure ou extérieure) indiquent des chocs ou vibrations anormales dues à des impacts entre les éléments du roulement. Un défaut sur la bague intérieure provoque des vibrations plus intenses que sur la bague extérieure, car la bague intérieure est directement en contact avec l'arbre rotatif.

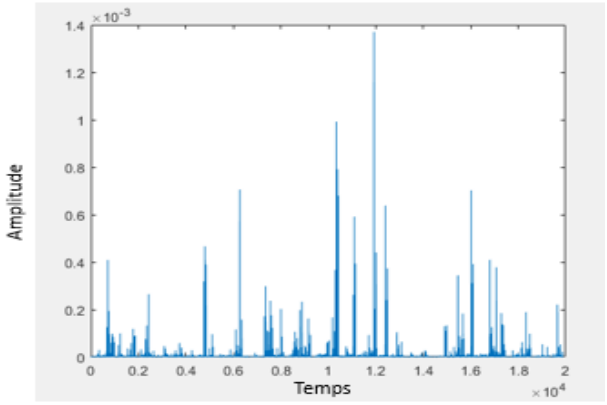


Figure 7. Enveloppe du FK - Roulement sain

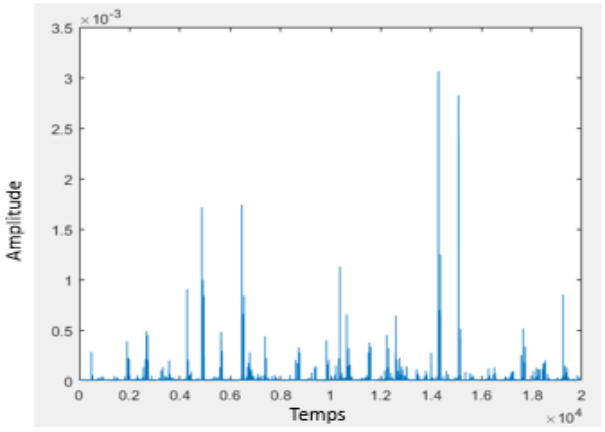


Figure 8. Enveloppe du FK - Défaut de bague intérieure

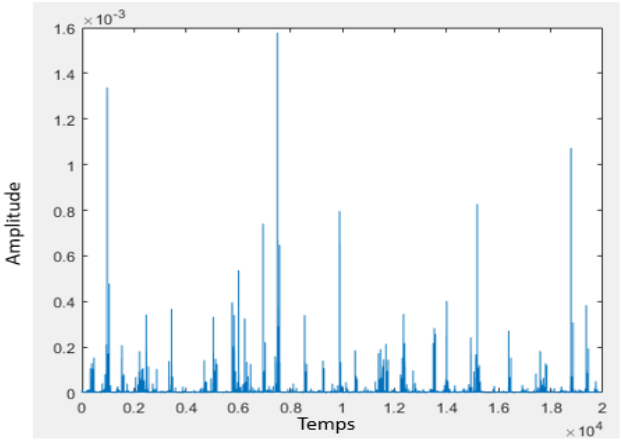


Figure 9. Enveloppe du FK - Défaut de bague extérieure

4.3 Classification

Sur la base de nos données, les classifications suivantes ont été

établies :

- Classe 1 : Roulement sain.
- Classe 2 : Défaut de la bague intérieure.
- Classe 3 : Défaut de la bague extérieure.

Pour effectuer cette classification et évaluer les performances de la méthode de FK-CWT, nous avons testé et confronté 3 modèles d'apprentissage :

- Naïve Bayes (NB)
- Arbres de décision (DT : Decision Tree).
- La forêt aléatoire (RF : Random Forest ; Nombre d'arbres = 200).

L'objectif de la prise en compte des 3 modèles (NB, DT, RF) est de mieux évaluer la robustesse de la méthode proposée vis-vis du modèle utilisé. Nous avons divisé nos données (matrices de caractéristiques) en deux parties : 70 % des données ont été utilisé pour l'entraînement et 30 % des données restantes pour les tests. Dans notre cas, on a utilisé la validation par « holdout ».

4.4 Evaluation des algorithmes

Nous avons utilisé la matrice de confusion, indicateur de performances adapté au problèmes multi-classes, pour évaluer les performances des algorithmes. La matrice de confusion donne une représentation détaillée des valeurs TP (True Positive) correctement classées, des valeurs FP (False Positive) classées dans la mauvaise classe, des valeurs faussement négatives FN (False Negative) appartenant à la classe incorrecte et des valeurs TN (True Negative) correctement classées dans l'une des autres classes. Pour mesurer l'efficacité des algorithmes nous avons calculé, à partir de la matrice de confusion [Shehzad et al., 2023], les métriques de performance Accuracy (précision) et LOSS (perte) :

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (3)$$

$$LOSS = 1 - Accuracy \quad (4)$$

Sur 10 tests, nous avons évalué l'Accuracy (ACC) de chaque modèle. Nous avons par ailleurs calculé l'Accuracy minimale, l'Accuracy maximale, l'Accuracy moyenne, et l'écart type d'Accuracy comme indiqué dans le tableau 1, afin de déterminer le modèle le plus précis et le plus stable parmi les trois utilisés.

Tableau 1. Modèles NB vs DT vs RF

	NB	DT	RF
Test 1	94.44 %	99.35 %	99.81 %
Test 2	95.18 %	99.35 %	99.72 %
Test 3	91.94 %	98.51 %	99.72 %
Test 4	94.25 %	98.61 %	99.81 %
Test 5	94.07 %	98.98 %	99.81 %
Test 6	89.44 %	98.88 %	99.62 %
Test 7	91.85 %	98.88 %	99.72 %
Test 8	90.92 %	98.61 %	99.44 %
Test 9	94.16 %	99.53 %	99.90 %
Test 10	92.31 %	98.70 %	99.72 %
ACC min	89.44 %	98.51 %	**99.44 %**
ACC max	95.18 %	99.53 %	**99.90 %**
ACC moy	92.86 %	98.94 %	**99.73 %**
ACC std	1.84	0.35	**0.12**

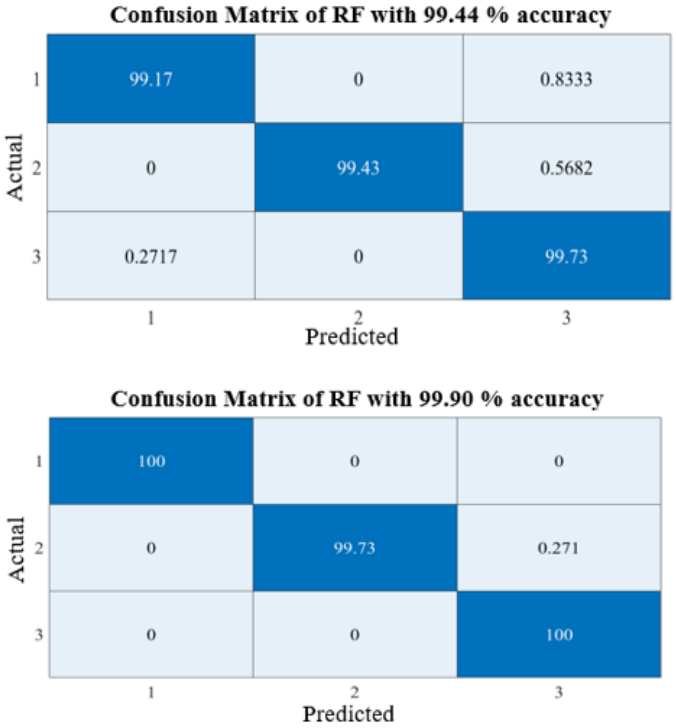


Figure 10. Matrice de confusion de RF – ACC max = 99.90 % et ACC min = 99,44 %)

Le classificateur Random Forest (RF) a montré des performances remarquables dans cette étude, avec une précision moyenne (ACC moy) de 99,73 % et un écart-type (ACC std) de 0,12 %, ce qui implique une bonne stabilité et des performances élevées. Cette haute précision reflète la capacité de l'algorithme à bien s'adapter aux données et à généraliser correctement sur différents ensembles de test. Pour une meilleure représentation des performances, nous présentons la matrice de confusion pour faire apparaitre la précision de classification de chaque classe. La Figure 10 montre la matrice de confusion de Random Forest pour deux tests avec une Accuracy minimale (ACC min = 99,44 %) et une Accuracy maximale (ACC max = 99.90 %). Les résultats obtenus mettent également en évidence l'importance du traitement des signaux à l'aide du FK et CWT. Cette approche a permis d'améliorer considérablement la qualité des données en éliminant les éléments indésirables ou non pertinents. Ce qui laisse envisager l'amélioration des performances des algorithmes d'apprentissage automatique.

Pour valider les performances et prouver l'efficacité de la méthode proposée dans le domaine du diagnostic vibratoire, nous avons comparé à d'autres méthodes récemment rapportées dans la littérature (2020-2025) qui ont utilisé le même ensemble de données (Zhu et al., 2021) et (Ahn et al., 2020) comme présenté dans le tableau 2. La détection et le diagnostic des défauts de roulements ont été réalisés dans (Zhu et al., 2021) en appliquant la transformée en paquets d'ondelettes (WPT), permettant d'extraire des caractéristiques temps-fréquence. Ensuite, une décomposition en valeurs singulières multi-pondérées (MWSVD) est appliquée pour réduire la dimensionnalité des données tout en conservant les informations sensibles aux défauts, qui ont été introduites dans le modèle SVM pour le diagnostic des défauts. Une méthode basée sur l'extraction de caractéristiques utilisant la classification des séries temporelles (TSC : Time series classification) a été proposée dans (Ahn et al., 2020), la méthode basée sur un indicateur de suffisance des données, cet indicateur est entraîné en utilisant la similarité cosinus, il détermine quand le classifieur peut commencer la classification. D'après le

tableau 2, on peut conclure que la méthode proposée peut atteindre la plus grande précision par rapport aux autres méthodes, ce qui signifie que la méthode FK-CWT est plus performante dans le contexte de cette étude.

Tableau 2. Approche proposée vs (Zhu et al., 2021) vs (Ahn et al., 2020)

Reference	Année	Méthode (traitement du signal)	Modèle (IA)	Accuracy (%)
(Zhu et al., 2021)	2021	WPT+MW SVD	SVM	87,87
(Ahn et al., 2020)	2020	TSC	SVM	88.89
Approche proposée	2025	FK+CWT	RF	**99.73**

5 CONCLUSION

Dans ce travail, pour le diagnostic des défauts de roulement basée sur l'analyse vibratoire, nous avons proposé et mis en œuvre une approche qui repose sur deux phases essentielles. La première, dédiée au traitement du signal, combine les techniques du Fast Kurtogram (FK) et de la Transformée en Ondelettes Continues (CWT). Les caractéristiques extraites ont été utilisé comme entrées à la seconde phase, dédiée à la classification de l'états des roulements. Dans cette phase 3 algorithmes d'apprentissage automatique ont été testés, Naïve Bayes (NB), Decision Tree (DT) et Random Forest (RF), pour un diagnostic en 3 classes : - roulement sain - défaut de bague intérieure - défaut de bague extérieure, à vitesses variables. Les résultats de la précision (ACC moy) de ces 3 modèles, sur l'ensemble des tests, sont respectivement 92.86%, 98.94%, 99.73%. Nous constatons que le modèle RF est le plus performant. En outre, ces résultats indiquent que la combinaison FK-CWT adoptée dans la phase de traitement du signal améliore la qualité des données injectée dans la phase 2, réduit le bruit du signal et augmente la performance des modèles. La comparaison aux performances d'autres approches récemment rapportées dans la littérature, nous a permis de valider l'approche proposée (FK-CWT/RF) et prouver son efficacité dans le domaine du diagnostic vibratoire,

6 REFERENCES

Abburi, H., Chaudhary, T., Ilyas, H., Manne, L., Mittal, D., Williams, D., Snaidauf, D., Bowen, E., & Veeramani, B. (2023). *A Closer Look at Bearing Fault Classification Approaches* (arXiv:2309.17001). arXiv. http://arxiv.org/abs/2309.17001

Aburakhia, S., Tayeh, T., Myers, R., & Shami, A. (2022). *Similarity-Based Predictive Maintenance Framework for Rotating Machinery* (arXiv:2212.14550). arXiv. http://arxiv.org/abs/2212.14550

Afia, A., Rahmoune, C., & Benazzouz, D. (2018). Gear fault diagnosis using Autogram analysis. *Advances in Mechanical Engineering*, *10*(12), 168781401881253. https://doi.org/10.1177/1687814018812534

Ahn, G., Lee, H., Park, J., & Hur, S. (2020). Development of Indicator of Data Sufficiency for Feature-based Early Time Series Classification with Applications of Bearing Fault Diagnosis. *Processes*, *8*(7), 790. https://doi.org/10.3390/pr8070790

Antoni, J. (2007). Fast computation of the kurtogram for the detection of transient faults. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *21*(1), 108–124. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.12.002

Antoni, J., & Randall, R. B. (2006). The spectral kurtosis: Application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *20*(2), 308–331. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2004.09.002

Boudiaf, R., Abdelkarim, B., & Issam, H. (2024). Bearing fault diagnosis in induction motor using continuous wavelet transform and convolutional neural networks. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, *15*(1), 591. https://doi.org/10.11591/ijpeds.v15.i1.pp591-602

Geng, Y., Wang, Z., Jia, L., Qin, Y., & Chen, X. (2020). Bogie fault diagnosis under variable operating conditions based on fast kurtogram and deep residual learning towards imbalanced data. *Measurement*, *166*, 108191. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108191

Huang, H., & Baddour, N. (2018). Bearing vibration data collected under time-varying rotational speed conditions. *Data in Brief*, *21*, 1745–1749. https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.11.019

Lei, Y., He, Z., Zi, Y., & Hu, Q. (2007). Fault diagnosis of rotating machinery based on multiple ANFIS combination with GAs. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *21*(5), 2280–2294. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2006.11.003

Lei, Y., Lin, J., He, Z., & Zi, Y. (2011). Application of an improved kurtogram method for fault diagnosis of rolling element bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *25*(5), 1738–1749. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.12.011

Lourari, A. W., Benkedjouh, T., El Yousfi, B., & Soualhi, A. (2024). ANFIS-based Framework for the Prediction of Bearing's Remaining Useful Life. *International Journal of Prognostics and Health Management*, *15*(1). https://doi.org/10.36001/ijphm.2024.v15i1.3791

Manjunatha, G., & Chittappa, H. C. (2022). Bearing Fault Classification using Empirical Mode Decomposition and Machine Learning Approach. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, *70*(4), 214. https://doi.org/10.18311/jmmf/2022/30060

Nishat Toma, R., & Kim, J.-M. (2020). Bearing Fault Classification of Induction Motors Using Discrete Wavelet Transform and Ensemble Machine Learning Algorithms. *Applied Sciences*, *10*(15), 5251. https://doi.org/10.3390/app10155251

Shehzad, K., Zhenhua, T., Shoukat, S., Saeed, A., Ahmad, I., Sarwar Bhatti, S., & Chelloug, S. A. (2023). A Deep-Ensemble-Learning-Based Approach for Skin Cancer Diagnosis. *Electronics*, *12*(6), 1342. https://doi.org/10.3390/electronics12061342

Thorsen, O. V. (1995). *A Survey of Faults on Induction Motors in Offshore Oil Industry, Petrochemical Industry, Gas Terminals, and Oil Refineries*.

Zhang, B., Zhang, S., & Li, W. (2019). Bearing performance degradation assessment using long short-term memory recurrent network. *Computers in Industry*, *106*, 14–29. https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.12.016

Zhu, H., He, Z., Wei, J., Wang, J., & Zhou, H. (2021). Bearing Fault Feature Extraction and Fault Diagnosis Method Based on Feature Fusion. *Sensors*, *21*(7), 2524. https://doi.org/10.3390/s21072524

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Détection d'anomalies dans les signaux de capteurs : application aux systèmes aéronautiques

MAYSSA BEJAOUI[1], LUIS MIGUEL MORENO HARO[1], ADAITON OLIVEIRA-FILHO[2], BRUNO AGARD[1], ANTOINE TAHAN[2]

[1] ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL
Montréal (QC) H3T 0A3, Canada
mayssa.bejaoui@polymtl.ca
luis-miguel.moreno-haro@polymtl.ca
bruno.agard@polymtl.ca

[2] ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPERIEURE
Montréal (QC) H3C 1K3, Canada
adaiton.moreira-de-oliveir-filho@etsmtl.ca
antoine.tahan@etsmtl.ca

***Résumé* – Les capteurs peuvent être sujets à diverses défaillances pouvant compromettre la qualité de leurs mesures. La détection des anomalies dans des signaux de capteurs est donc essentielle pour garantir la fiabilité et la sécurité des systèmes. Pour répondre à ces enjeux, les approches basées sur l'intelligence artificielle se révèlent particulièrement efficaces.**

Dans cet article, nous développons une méthode de détection d'anomalies basée sur un auto-encodeur variationnel avec des filtres de réseau neuronal convolutionnel (CVAE). Nous explorons également d'autres architectures, telles que LSTM et CNN, pour évaluer leur pertinence face à cette problématique. Notre méthodologie repose sur la transformation des données en images mettant en évidence des propriétés statistiques telles que la moyenne, la variance, l'entropie et la corrélation. Plusieurs métriques sont ensuite utilisées pour détecter différents types de pannes. L'approche est validée sur un ensemble de données industrielles réelles issues d'un système électromécanique, démontrant son efficacité pour la détection de défaillances multiples et offrant un outil visuel pratique pour l'analyse des pannes.

***Mots clés* - Détection d'anomalies, auto-encodeur variationnel, défaillance de capteur, LSTM, CNN.**

***Keywords* – Anomaly detection, variational autoencoder, sensor failure, LSTM, CNN.**

1 INTRODUCTION

La fiabilité des capteurs est un enjeu majeur pour de nombreux secteurs, notamment dans l'aéronautique, où les systèmes automatisés jouent un rôle essentiel. Ces dispositifs captent une entrée physique de leur environnement, la convertissent en un signal analogique ou numérique, et le rendent exploitable par un système informatique [Ali et al., 2023].

Toutefois, les capteurs peuvent être sujets à des défaillances. Une défaillance de capteur se définit comme toute situation où le capteur ne remplit pas correctement son rôle ou sa fonction, ce qui peut entraîner une perte partielle ou totale de sa fonctionnalité [Moreno et al., 2023]. Les types de défaillances les plus courants incluent le biais, la saturation, le bruit et les étincelles [Takai, 2021], et ils peuvent se produisent pour diverses raisons, telles que des défauts de fabrication, l'usure, une calibration incorrecte ou une mauvaise manipulation [Balaban et al., 2009].

La détection précoce des défaillances de capteurs est essentielle pour en atténuer l'impact et mettre en place des mesures correctives [Li et al., 2020]. Différentes techniques existent pour analyser l'état d'un capteur. En particulier, en exploitant des modèles d'apprentissage automatique et profond, il devient possible d'identifier des comportements anormaux dans les séries temporelles issues des capteurs, ce qui permet de minimiser les coûts liés aux pannes imprévues et aux interruptions non planifiées.

La méthodologie proposée dans cet article repose sur l'identification des zones de variations significatives dans les données. Pour cela, les données des capteurs sont converties en images représentant certaines de leurs propriétés statistiques puis un modèle d'apprentissage automatique (CVAE) est mis en œuvre pour la détection d'anomalies. Une évaluation expérimentale en mode hors ligne, réalisée sur un ensemble de données industrielles réelles, démontre l'efficacité de cette approche pour la détection de multiples types de défaillances.

Dans la suite de cet article, la section 1 présente les fondements théoriques de cette étude. La section 2 explore l'état de l'art. La section 3 détaille les étapes clés de notre approche. Enfin, la section 4 expose les résultats expérimentaux obtenus et discute les performances de notre méthode.

2 FONDEMENTS THEORIQUES

L'analyse des défaillances des capteurs repose sur des bases théoriques solides qui permettent de comprendre les différentes perturbations pouvant affecter les mesures. Cette section présente les principaux types de défaillances sur lesquels nous avons travaillé, les descripteurs statistiques utilisés, ainsi que les modèles d'apprentissage appliqués pour leur détection.

2.1 Types de défaillances d'un capteur

Un dysfonctionnement de capteur peut entraîner une mesure non significative dans le signal observé. Si $r(t)$ est le signal réel d'un phénomène physique et $m(t)$ le signal tel que mesuré par un capteur au temps t, on définit le bruit de mesure (ε) par :

$$\varepsilon = m(t) - r(t) \quad (1)$$

Dans un scénario idéal, le signal réel *r(t)* est exactement le signal mesuré $m(t)$ et l'erreur est nulle ($\varepsilon = 0$). En pratique, quand $\varepsilon \ll r(t)$, on considère que le capteur est dans un état de fonctionnement sain. À partir de ces notations, nous considérons les types de défaillances suivants :

2.1.1 Défaillance de type biais

Une défaillance de type biais est définie comme un décalage constant (erreur systématique) du signal mesuré du capteur. Un biais peut se produire en raison d'un étalonnage incorrect ou d'une altération [Balaban et al., 2009]. Dans ce cas, l'erreur est constante ($\varepsilon = \theta$) et la mesure apparente est donnée par :

$$m(t) = r(t) + \theta \quad (2)$$

2.1.2 Défaillance de type saturation

Une saturation se produit généralement lorsqu'un capteur mesure une valeur supérieure à son intervalle opérationnel de fonctionnement [Dang et Suh, 2014]. Cela implique que sa sortie est figée à la valeur maximale ou minimale. On a alors :

$$m(t) = \begin{cases} V_{max} & r(t) > V_{max} \\ r(t) & V_{min} \leq r(t) \leq V_{max} \\ V_{min} & r(t) < V_{min} \end{cases} \quad (3)$$

Où V_{max} et V_{min} sont les limites supérieures et inférieures de fonctionnement autorisées par le capteur avant qu'une saturation ne survienne.

2.1.3 Défaillance de type gel de capteur

Un « gel de capteur » désigne une défaillance au cours de laquelle la mesure donnée par le capteur est constante sur une plage de temps [Zidi et al., 2018], soit :

$$m(t) = \begin{cases} r(t) & t < t_1 \\ \theta & t_1 \leq t \leq t_2 \\ r(t) & t > t_2 \end{cases} \quad (4)$$

Où θ représente la valeur "gelée" du signal mesuré pendant la période $t_1 \leq t \leq t_2$. t_1 est le moment où commence la période du gel, t_2 est le moment où se termine la période du gel.

2.1.4 Défaillance de type bruit excessif

L'environnement dans lequel les capteurs fonctionnent peut-être sensible à diverses sources de bruit. Le bruit interne provient principalement des caractéristiques des composants du capteur et du circuit. Le bruit externe, quant à lui, provient d'interférences d'origine humaine ou environnementale situées en dehors du circuit du capteur. Bien que la présence de bruit soit courante dans les données des capteurs, un niveau de bruit élevé peut entraîner des problèmes dans les signaux des capteurs. Le bruit excessif limite en effet les performances que l'on peut obtenir d'un dispositif donné [Bordoni et D'Amico, 1990]. Dans ce cas, ε est du même ordre de grandeur que $r(t)$.

2.1.5 Défaillance de type étincelle

Une défaillance de type "étincelle" dans un signal de capteur est une perturbation soudaine et brève dans la mesure du capteur. Cette perturbation est représentée mathématiquement par une fonction de Dirac, symbolisée par $\delta(t)$. Cette défaillance est donc modélisée par une impulsion au moment t_0 et est généralement associée à une amplitude A [Li et Li, 2013].

Ce type de perturbation est modélisé par :

$$m(t) = r(t) + A\,\delta(\mathrm{t} - t_0) \quad (5)$$

2.2 Descripteurs statistiques

Les descripteurs statistiques permettent d'évaluer certaines caractéristiques dans des ensembles de données. Ils fournissent une piste potentielle pour la détection des comportements suspects de capteurs. Dans les définitions qui suivent, nous supposons que, pour un événement *j*, le capteur *i* mesure un phénomène physique et génère des données à l'instant t_k, représentées par le vecteur d'information $X_{ij} = \{x_{ij}(t_k)\}_{N_d \times 1}$, où N_d est le nombre de données.

2.2.1 La moyenne et la variance

L'équation (6) présente la moyenne des mesures du capteur *i*, pour l'événement *j* :

$$\bar{x}_{ij} = \frac{1}{N_d - 1} \sum_{k=0}^{N_d - 1} x_{ij}(t_k) \quad (6)$$

L'équation (7) présente la variance des mesures du capteur *i*, pour l'événement *j* :

$$VAR(x_{ij}) = \frac{1}{N_d - 2} \sum_{k=0}^{N_d - 1} (x_{ij}(t_k) - \bar{x}_{ij})^2 \quad (7)$$

2.2.2 L'obliquité et le kurtosis

L'obliquité (8) et le kurtosis (9) révèlent des asymétries et des pointes (étincelles) dans les données. Ils se calculent de la manière suivante :

$$S(x_{ij}) = \frac{\frac{1}{N_d - 1} \sum_{k=0}^{N_d - 1} (x_{ij}(t_k) - \bar{x}_{ij})^3}{\left(\frac{1}{N_d - 2} \sum_{k=0}^{N_d - 1} (x_{ij}(t_k) - \bar{x}_{ij})^2\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (8)$$

$$K(x_{ij}) = \frac{1}{N_d - 1} \sum_{k=0}^{N_d - 1} \left(\frac{(x_{ij}(t_k) - \bar{x}_{ij}}{\sqrt{VAR(x_{ij})}} \right)^4 \quad (9)$$

2.2.3 L'entropie

L'entropie (éq. 10) fournit une mesure du désordre dans les données, elle permet la détection des variations subtiles qui pourraient signaler une défaillance.

$$H(x_{ij}) = -\sum_{k=0}^{N_d - 1} p(x_{ij}(t_k)) Log\,(p(x_{ij}(t_k))) \quad (10)$$

2.2.4 Le coefficient de corrélation de Pearson (r)

La redondance possible de plusieurs capteurs nous suggère d'examiner les corrélations entre eux : on s'attend à avoir de très fortes corrélations entre les capteurs redondants et si jamais, un de ces capteurs est défaillant, la corrélation sera faible. L'équation (11) estime le coefficient de la corrélation de Pearson entre deux séries temporelles, x_{mj} et x_{nj} (correspondant à deux capteurs m et n), pour un même l'événement j.

$$r_{x_{nj}, x_{mj}} = \frac{\sum_{k=0}^{N_d - 1} (x_{mj}(t_k) - \bar{x}_{mj})(\mathrm{x}_{nj}(t_k) - \bar{x}_{nj})}{\sqrt{\sum_{k=0}^{N_d - 1} (x_{mj}(t_k) - \bar{x}_{mj})^2 \sum_{k=0}^{N_d - 1} (x_{nj}(t_k) - \bar{x}_{nj})^2}} \quad (11)$$

2.3 Modèles d'apprentissage pour la détection d'anomalies

La détection d'anomalies dans les signaux des capteurs repose sur différentes stratégies capables d'identifier les comportements inhabituels. Parmi ces modèles, plusieurs approches basées sur les réseaux de neurones se sont révélées efficaces [Bailly, 2023]. Bien que ce travail se concentre sur l'approche CVAE, les architectures CNN et LSTM sont présentées à titre comparatif afin de mieux positionner la contribution proposée et d'ouvrir des perspectives de consolidation ou de combinaison de ces méthodes.

2.3.1 Réseaux de neurones convolutifs (CNN)

Les réseaux de neurones convolutifs sont des architectures qui reposent sur l'utilisation de noyaux de convolution, des filtres qui permettent d'extraire automatiquement des caractéristiques pertinentes des données d'entrée. Les paramètres des noyaux sont appris pendant la phase d'apprentissage du réseau de neurones. En plus des couches convolutives, les CNNs utilisent des couches de sous-échantillonnage, telles que le max-pooling, qui permettent de diminuer la dimension des données au fur et à mesure de la profondeur du réseau de neurones.

C'est grâce aux performances obtenues en traitement d'image des CNNs que la communauté en traitement de signal a commencé à regagner de l'intérêt pour les CNNs à une dimension. Ils ont été utilisés pour répondre à de nombreuses problématiques concernant des séries temporelles tels que la classification de signaux d'électroencéphalogramme (EEG), la détection de pannes et la prédiction de séries temporelles ou la détection d'anomalies [Bailly, 2023]. Les réseaux de neurones ont aussi été exploités dans le cadre de la détection d'intrusions [Jadidi et al., 2013] et [Javaid et al., 2016]. D'autres chercheurs ont utilisé un réseau neuronal hybride C-LSTM pour détecter des anomalies dans les données de trafic Web [Kim et Cho, 2018].

L'inconvénient majeur des réseaux de neurones est leur nature « boite noire ». En effet, l'humain n'a pas de contrôle sur les règles de décision apprises et les algorithmes appris sont difficilement interprétables [Kraiem, 2021].

2.3.2 Réseau mémoire longue à court terme / Long short-Term Memory (LSTM)

Les réseaux de neurones récurrents sont conçus spécifiquement pour traiter des données séquentielles. Ils introduisent des connexions récurrentes entre les couches du réseau ce qui leur permet de conserver une mémoire interne et de prendre en compte la temporalité des données. Lors de l'entraînement des réseaux profonds, les gradients s'affaiblissent, limitant l'apprentissage. Ce phénomène, appelé évanescence du gradient, a conduit au développement de techniques telles que les LSTMs pour atténuer ce problème [Bailly, 2023].

Les LSTMs intègrent des portes qui permettent de contrôler le flux d'informations dans les cellules du réseau, ce qui leur permet de mémoriser des informations pendant de plus longues séquences et d'apprendre des dépendances à long terme. Les cellules LSTM disposent d'états cachés qui permettent de jouer un rôle de mémoire. Elles reposent pour cela sur un ensemble de portes [Bailly, 2023] :

- Une porte d'entrée, qui permet d'ajouter l'information de l'instant présent x_t ;
- Une porte d'oubli, qui définit la quantité d'information à oublier de la part la cellule précédente c_{t-1} ;
- Une porte de sortie, qui permet de calculer l'état de la cellule courante c_t à passer à la prochaine cellule.

La conception des LSTMs les rend très utiles lors de l'apprentissage pour des données ayant des longues dépendances temporelles et donc en particulier l'étude de séries temporelles des capteurs [Kim et Cho, 2018].

2.3.3 Auto-encodeur variationnel avec filtres de réseau neuronal convolutif

Notre approche implémente un Auto-encodeur variationnel avec filtres de réseau neuronal convolutif (CVAE). Ce modèle a été retenu en raison de son adéquation à l'apprentissage automatique avec des données semi-supervisées sous forme d'images et aussi pour sa large validation dans des applications pour la détection de défauts dans différents types de capteurs, dans différents domaines.

L'auto-encodeur variationnel (VAE) a une structure similaire à celle de l'AE (Auto-encodeur). Le VAE se compose d'un encodeur qui déduit les paramètres de la distribution de probabilité à partir des entrées du décodeur, plutôt que de déduire directement les entrées du décodeur (comme pour le cas de l'AE). En conséquence, alors que le décodeur d'un AE reçoit une entrée déterministe, le décodeur d'un VAE reçoit des entrées probabilistes, pour une situation d'origine identique [Kim et al., 2019].

Pour générer les entrées des décodeurs, c'est-à-dire des vecteurs latents aléatoires, à partir des paramètres de la distribution déduite, une étape d'échantillonnage est incorporée entre l'encodeur et le décodeur. Grâce à la nature stochastique du VAE, il est non seulement utilisé pour reproduire des entrées, mais également pour générer des ensembles de données complètement nouveaux présentant des similitudes avec les entrées.

La figure 1 montre la structure générale d'un auto-encodeur variationnel où z représente le vecteur latent résultant, μ représente la moyenne de la distribution normale, σ est l'écart-type et ϵ est un terme d'erreur aléatoire. L'équation (12) complète est :

$$z = \mu + \sigma \cdot \epsilon \tag{12}$$

En tant que type de modèle génératif, les VAE ont été appliqués dans divers domaines, tels que l'augmentation des données et le traitement du langage naturel [Gunduz, 2021].

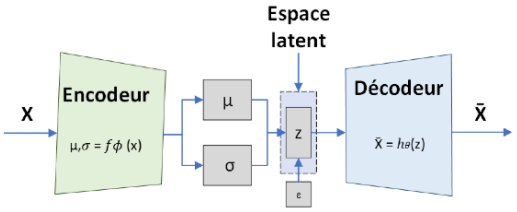


Figure 1. Structure de l'auto-encodeur variationnel

3 ÉTAT DE L'ART

De nombreux travaux de recherche ont été menés pour détecter les défaillances des capteurs.

3.1 Détection de défaillance de type biais

Pour la détection de défaillance de type biais, Zhao et al. (2016) proposent une méthode qui utilise l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Dans la phase de modélisation, les sorties des capteurs sont collectées et soumises à une normalisation, puis la technique de ACP est appliquée pour décomposer les données normalisées en composantes principales pour obtenir les matrices de scores et une matrice résiduelle contenant les erreurs non expliquées. Le nombre de composantes principales à retenir est déterminé en fonction de leur contribution cumulative. Enfin, des statistiques de surveillance, en utilisant une projection dans un espace d'erreurs, sont calculées pour détecter les défaillances de capteurs lorsque ces statistiques dépassent certaines limites

3.2 Détection de défaillance de type bruit

Kim et al. (2019) ont proposé un modèle basé sur des auto-encodeurs variationnels (VAE) pour l'identification des défaillances dues à un excès de bruit dans les signaux. La méthodologie proposée pour détecter ces défaillances comprend deux étapes principales : (1) le préentraînement du modèle et (2) l'identification des défaillances dans les signaux. Lors de la phase de préentraînement, le VAE est formé en utilisant des ensembles de signaux normaux dans le but d'apprendre des caractéristiques implicites de ces signaux et de pouvoir générer de manière réaliste des ensembles de signaux normaux dans le même espace. Une fois que le VAE est préentraîné, il est utilisé dans l'identification des défaillances des signaux. Le modèle reçoit des ensembles de signaux présentant des défaillances en tant qu'entrées et compare les sorties générées avec les entrées d'origine. L'objectif est de détecter les défaillances de type bruit entre l'entrée et la sortie. Pour valider l'applicabilité de cette méthode d'identification des défaillances, des séquences de défaillances ont été appliquées à 1 000 données unitaires sélectionnées au hasard avec des bruits artificiellement injectés.

3.3 Détection de défaillance de type saturation

Selon Reddy et al. (2020), la saturation se produit lorsque les amplitudes du signal atteignent soit zéro, soit la tension de référence maximale du capteur. Dans la méthode qu'ils proposent, la détection de saturation est obtenue en surveillant l'amplitude du signal et en la comparant à des seuils prédéfinis, garantissant que le signal reste dans la plage de fonctionnement du capteur. Ces seuils aident à capturer non seulement la saturation complète, mais également les petites fluctuations proches des limites de la résolution du capteur, ce qui peut indiquer des problèmes potentiels dans l'acquisition du signal. Lorsque plusieurs échantillons consécutifs sont détectés dans ces plages, le système identifie le signal comme saturé et le rejette du traitement ultérieur. Pour améliorer encore la fiabilité du système, l'algorithme de détection peut classer les segments saturés en fonction de leur durée, ce qui permet une analyse plus détaillée de l'impact de la saturation sur le signal global. Cette

méthode permet de garantir que les données erronées dues à la saturation du capteur n'affectent pas l'analyse globale et que les parties non saturées du signal peuvent toujours être traitées sans distorsion.

3.4 Détection de diverses défaillances par un seul modèle

Dans des systèmes de moteurs d'avion, Jan et al. (2020) décrivent une méthodologie pour la détection de défaillances de types biais, étincelle et gel de capteurs. Ils utilisent différentes étapes dont : la création d'un modèle, l'introduction de défaillances de capteurs simulés, la création d'un modèle de diagnostic de défaillance et la mise en œuvre d'un système de détection. L'approche proposée utilise un auto-encodeur (AE) pour extraire les caractéristiques du signal brut du capteur. Le vecteur de fonctionnalités est ensuite transmis à un algorithme de classification qui utilise les vecteurs de support machine (SVM) pour l'identification des défaillances. L'AE utilisé se compose d'un encodeur suivi d'une réplique en miroir de l'encodeur appelée décodeur. Les nœuds d'entrée et de sortie (première couche d'encodeur et couche finale de décodeur) sont égaux. L'AE apprend les représentations du signal brut en essayant de générer une copie exacte du signal d'entrée au niveau de la couche de sortie.

De leur côté, De Silva et al. (2021) présentent une approche hybride pour la détection des défaillances des capteurs, appliquée dans le cadre d'essais en vol. Leur approche combine des techniques d'apprentissage automatique avec des algorithmes basés sur les données pour améliorer la détection des défaillances des capteurs dans les systèmes régis par des principes physiques sous-jacents. À l'aide de données de vols commerciaux, la méthode se concentre sur la détection de divers types de défaillances de capteurs, notamment les défaillances catastrophiques, les oscillations lentes, l'augmentation du bruit et les dérives lentes. La méthodologie proposée fonctionne en deux phases : (1) une phase hors ligne pour entraîner le modèle, en utilisant la décomposition modale dynamique avec contrôle (DMDc), afin d'approximer l'évolution des mesures d'intérêt et entraîner un arbre de décision, et (2) une phase en ligne pour la détection des défauts en temps réel, appliquant le modèle entraîné à de nouvelles données pour prédire les défaillances de capteurs sensoriels. Cette approche s'est avérée efficace pour détecter avec précision des défaillances de capteurs dans les données d'essais en vols commerciaux, mais a également montré son applicabilité dans les modèles simulés d'aérodynamique instable et de dynamique de vol longitudinal. Cette méthodologie est principalement appliquée dans le domaine des essais en vol et dans le domaine de la surveillance de la fiabilité des systèmes de capteurs dans l'industrie aérospatiale.

Un autre exemple est fourni par Chen et al. (2022). Ils utilisent le SVM comme classificateur pour catégoriser les caractéristiques provenant de plusieurs capteurs de moteurs d'avion. Le but est de déterminer le type de défaillance à partir des données enregistrées par les capteurs du moteur. Les auteurs disposent pour cela d'une base de données étiquetée avec 500 signaux identifiés pour chaque type de défaillance. Parmi les défaillances existantes figurent les défaillances de type biais, dérive et étincelle. De plus, les signaux sans défaillances sont inclus dans la base de données. Les auteurs effectuent un processus de formation modèle, prenant en compte les étiquettes et utilisent ensuite une base de données de tests pour la détection.

Le tableau 1 résume les méthodes de défaillance des capteurs et les domaines associés.

Tableau 1. Relation entre la méthode et le domaine avec le type de défaillance des capteurs

Référence	1	2	3	4	5	6	Domaine	
[Zhao et al., 2016]			×				Aéronautique	Stat
[Jan et al., 2020]			×	×		×	SCP	AA
[Kim et al., 2019]					×		Énergie	AA
[Reddy et al., 2020]		×					Surveillance de la santé	Stat
[de Silva et al., 2021]	×				×		Aéronautique	AA
[Chen et al., 2022]			×	×	×	×	Aéronautique	AA

Où : 1 = Absence de signal, 2 = Saturation, 3 = Biais, 4 = Gel, 5 = Bruit, 6 = Étincelle, et SCP = Systèmes cyber-physique. La dernière colonne présente les méthodes utilisées : apprentissage automatique (AA) ou statistique (Stat).

Pour conclure cet état de l'art, nous observons qu'il existe différentes approches pour la détection des défaillances de capteurs. Cependant, aucune des références examinées ne propose une méthode non supervisée à la fois capable de couvrir l'ensemble des types de défaillances, généralisable et robuste face à des signaux bruités et hétérogènes. La majorité des travaux ciblent un type spécifique de défaillance, alors qu'un système embarqué doit pouvoir détecter simultanément différents types d'anomalies. De plus, de nombreuses méthodes reposent sur des données étiquetées, rarement disponibles en contexte industriel. Enfin, les approches existantes sont souvent conçues pour un seul capteur ou une configuration précise, sans tenir compte de la diversité des dynamiques présentes dans les systèmes multi-capteurs. Pour répondre à ces défis, cette recherche propose une approche combinant l'extraction de descripteurs statistiques issus de différents capteurs mesurant chacun un phénomène physique différent, avec la modélisation par un auto-encodeur variationnel convolutif (CVAE), capable de détecter le type spécifique de l'anomalie dans un capteur. Cette méthode permet une détection non supervisée, généralisable et applicable à une large gamme de signaux de capteurs industriels.

4 APPROCHE PROPOSEE : METHODE DE DETECTION DES DEFAILLANCES

L'objectif de cette recherche est de détecter plusieurs types des défaillances dans des mesures issues de capteurs. Pour cela, nous proposons d'utiliser un modèle CVAE utilisant des filtres CNN, sur des images construites à partir de matrices d'informations dérivées de descripteurs statistiques calculés sur les données des séries temporelles des données de capteurs.

Nous analysons donc des ensembles de séries temporelles x_i, correspondant aux mesures enregistrées lors de divers événements j. Pour chaque événement j, nous collectons les mesures des capteurs correspondantes x_{ij}, organisées sous forme de vecteurs. Cela conduit à la formation d'une matrice X_{ij}, représentant l'ensemble complet des données du capteur i lors de l'événement j.

Une hypothèse sous-jacente est que les différents événements j partagent certaines similarités, ce qui justifie la comparaison des données issues de divers événements j pour identifier des anomalies. En apprenant à partir des mesures x_i sur plusieurs événements j, nous visons à détecter des comportements anormaux dans les données du capteur i spécifiques à un événement j.

La méthodologie proposée a été construite de manière à répondre à plusieurs contraintes. Chaque étape a été conçue pour adresser un verrou spécifique.

Tout d'abord, la sélection de la région d'intérêt permet de concentrer l'analyse uniquement sur les périodes pertinentes de chaque événement. Le calcul des descripteurs statistiques permet ensuite de synthétiser l'information temporelle en une représentation stable, facilitant les comparaisons entre événements. La conversion des évaluations des descripteurs statistiques en images offre alors une représentation synthétique de chaque événement, qui sera ensuite exploité par les capacités d'apprentissage des architectures convolutives.
Le modèle CVAE est particulièrement bien adapté compte tenu de sa capacité à modéliser les comportements normaux et donc à détecter des écarts anormaux, via deux mécanismes complémentaires : l'un basé sur l'erreur de reconstruction, l'autre exploitant l'espace latent. Ceci permet une détection non supervisée, généralisable, et adaptée à une large variété de situations industrielles.
La méthodologie proposée est illustrée dans la Figure 2.

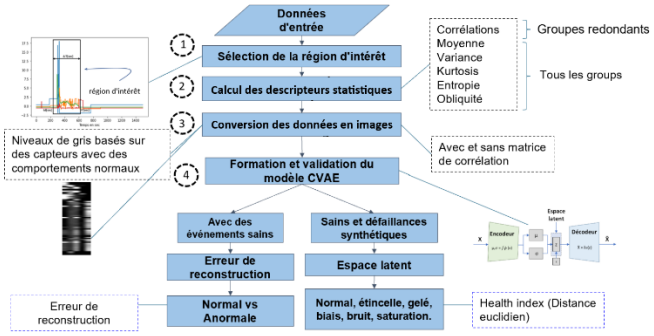


Figure 2. Organigramme des étapes de la méthodologie proposée pour la détection des défaillances des capteurs, tirée de [Moreno, 2024]

4.1 Sélection de la région d'intérêt

Cette étape consiste à identifier la fenêtre de temps pertinente à chaque événement, et isoler les mêmes fenêtres temporelles dans le traitement des données de capteurs. Seules ces informations sont prises en compte dans les étapes suivantes de l'analyse. La définition de la région d'intérêt implique plusieurs étapes clés. Tout d'abord, il est essentiel de détecter les limites de l'événement en identifiant les points de départ et de fin grâce à l'analyse des données des capteurs. Cela nécessite une compréhension des caractéristiques spécifiques de l'événement et la détermination du moment où les mesures significatives commencent et se terminent. Une fois les points de départ et de fin établis, la fenêtre temporelle correspondante est isolée, garantissant que les données non pertinentes en dehors de cette fenêtre n'influencent pas les résultats. La longueur et la durée de la région d'intérêt peuvent être adaptées aux applications spécifiques. En fonction de la nature de l'analyse et des caractéristiques des événements étudiés, une période avant l'événement peut être nécessaire dans certains cas, tandis que dans d'autres, une brève fenêtre post-événement pourrait être plus pertinente.

4.2 Calcul des descripteurs statistiques

Une fois la région d'intérêt isolée pour chacun des événements, le calcul des descripteurs statistiques pour chaque capteur est effectué. Des matrices $n \times m$ sont alors obtenues, où n représente le nombre de descripteurs statistiques utilisés et m le nombre de capteurs. Dans le cas où la corrélation est utilisée, en plus de ces descripteurs, la taille de la matrice de données dépendra du nombre de capteurs redondants pris en compte. Si le mécanisme étudié ne contient pas de capteurs redondants, les calculs de corrélation ne sont pas nécessaires.

4.3 Conversion des données en images

Cette étape consiste à créer une représentation sous forme d'image pour chaque événement. Chaque valeur de pixel correspond à la valeur normalisée d'un descripteur statistique pour chaque capteur. Plus précisément, pour chaque événement, nous convertissons la valeur de chaque descripteur statistique de chaque capteur en un pixel, en un certain niveau de gris. L'intensité du pixel reflète l'ampleur du descripteur. La conversion en niveaux de gris implique deux étapes clés : la normalisation et l'attribution des valeurs aux pixels. La normalisation est effectuée sur l'ensemble des événements afin d'assurer la cohérence de l'échelle des descripteurs, permettant ainsi des comparaisons significatives entre différents événements. La formule de normalisation est présentée par l'équation (13) ci-dessous :

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(X_{ij})}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})} \quad (13)$$

Où y_{ij} représente la valeur normalisée des mesures x_{ij} du capteur i pour l'événement j, et X_{ij} est la matrice contenant les informations du capteur i et de l'événement j. La valeur normalisée est ensuite multipliée par 255 pour la convertir en une intensité de pixel, où 0 correspond à noir et 255 correspond à blanc. Si les valeurs minimale et maximale sont égales, le pixel est défini à 0. Le niveau de gris du pixel pour chaque descripteur statistique est donné dans l'équation (14) :

$$P_{ij} = 255 \times \frac{x_{ij} - \min(X_{ij})}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})} \quad (14)$$

Où P_{ij} représente la valeur du pixel pour les mesures x_{ij} du capteur i pour l'événement j. La normalisation garantit que les valeurs des pixels représentent des différences relatives entre tous les événements, et pas seulement au sein d'un seul événement, offrant ainsi une vue plus complète des données.
Une fois que toutes les images sont créées, elles sont regroupées dans une base de données d'images, permettant ainsi une analyse ultérieure en vue de la détection des défaillances.

4.4 Formation et validation du modèle CVAE

Pour entraîner le CVAE, nous commençons par alimenter le modèle avec les images de descripteur statistiques extraites des données de séries temporelles. Le CVAE se compose de deux principales parties : l'encodeur et le décodeur. L'encodeur traite l'entrée et la compresse en une représentation dans l'espace latent à dimension réduite tout en capturant les caractéristiques essentielles des données. Le décodeur reconstruit ensuite les données (images) à partir de cet espace. L'entraînement du modèle est guidé par une fonction de perte totale, qui permet d'ajuster ses paramètres. Nous optimisons ensuite ces paramètres en utilisant l'algorithme Adam [Kingma, 2014], en mettant à jour les poids en fonction de la perte calculée. Ce processus est répété pendant plusieurs époques, chaque époque implique le passage de l'ensemble du jeu de données d'entraînement à travers le modèle pour mettre à jour ses paramètres. La méthode implémentée utilisera deux stratégies pour détecter les défaillances : l'erreur de reconstruction du modèle (représenté à gauche sur la figure 2) et la position dans l'espace latent (représenté à droite sur la figure 2).

4.4.1 Méthode de l'erreur de reconstruction

Dans la première stratégie, nous entraînons tout d'abord le modèle CVAE uniquement avec des données (images) considérées comme saines (aucun capteur n'a présenté de défaillance). Par la suite, de nouvelles images sont passées à travers le CVAE et l'erreur de reconstruction de ces images est calculée. L'erreur de reconstruction (e) permet d'évaluer dans

quelle mesure le modèle peut recréer les données originales à partir du modèle appris sur les images saines. Elle dépend donc des données reconstruites ($\bar{X}$) et des données originales (X) et se calcul ainsi (éq. (15)).

$$e = X - \bar{X} \quad (15)$$

Les erreurs de reconstructions seront ensuite analysées pour estimer une possible défaillance de capteur. Si l'erreur de reconstruction dépasse un seuil défini, l'image sera considérée comme anormale et permettra d'identifier l'événement comme possédant au moins un capteur défectueux.

4.4.2 Méthode de l'espace latent

Dans cette seconde stratégie, nous entraînons le modèle CVAE en utilisant des images qui représentent des évènements avec des pannes synthétiques et contrôlées, que nous souhaitons ensuite retrouver par leur positionnement dans l'espace latent. Dans un espace latent, les images partageant des caractéristiques similaires sont positionnées à proximité les unes des autres dans des régions densément peuplées et lorsqu'une image est différente, elle est située dans une région différente.

Pour détecter les écarts par rapport aux conditions normales de fonctionnement, nous utilisons alors un Indice de Santé. Il s'agit d'une métrique qui quantifie l'état d'un système par rapport aux conditions normales. Le processus de l'Indice de Santé repose sur l'application du test statistique du χ^2 et inclue ces étapes :

1. La définition d'une distribution attendue pour les échantillons.
2. La génération d'échantillons qui représentent les variables latentes apprises par le modèle pendant l'apprentissage.
3. La catégorisation des échantillons générés.
4. Le calcul des fréquences observées des échantillons de chaque catégorie et leur comparaison aux fréquences attendues.
5. L'application du test du chi carré pour déterminer s'il existe une différence notable entre les fréquences observées et attendues par l'équation (16) :

$$Khi^2 = \sum \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (16)$$

Où O_i représente les fréquences que nous avons observées dans chaque catégorie, tandis que E_i désignent les fréquences que nous attendions en fonction de notre distribution théorique.

5 Resultats et Discussion

L'ensemble du processus de détection a nécessité un temps d'exécution d'environ 1 h 30 min. Les expériences ont été réalisées sur un ordinateur portable équipé d'un processeur Intel Core i7-1165G7 de 11e génération (2.80 GHz), de 16 Go de RAM (3200 MHz) et d'un GPU intégré de 2 Go.

Les performances de la méthodologie proposée sont évaluées sur des données synthétiques et sur un jeu de données contenant des séries temporelles issues de capteurs d'un système électromécanique dans le domaine aéronautique. Chaque capteur prend une mesure à chaque seconde, soit une fréquence d'échantillonnage de 1 Hz.

L'un des principaux défis est que seuls quelques événements ont été classifiés par le partenaire industriel comme présentant des signaux anormaux, alors que plusieurs milliers sont considérés comme normaux.

Dans cette étude, deux approches d'extraction de caractéristiques sont testées : l'une repose uniquement sur des descripteurs statistiques standards de moyenne, kurtosis, variance, obliquité et entropie (appelés par la suite : images composites à 5 descripteurs) et l'autre intègre la corrélation entre les capteurs redondants (images composites à 6 descripteurs. La figure 3 représente deux images représentatives, générées à partir des descripteurs statistiques, de leur normalisation (0,1) et de l'utilisation de niveaux de gris.

(a) l'état sain (b) l'état gelé

Figure 3. Images en niveaux de gris : représentation visuelle des caractéristiques pour différents états

La première correspond à un fonctionnement en condition saine, tandis que l'autre contient un capteur gelé. Chaque image a une taille de pixel de 5×77, ce qui correspond à l'utilisation de 5 descripteurs pour les 77 capteurs du mécanisme.

5.1 Architecture et formation du modèle CVAE

La dimension d'entrée du modèle CVAE est 5×77. L'espace latent est défini avec la dimension $latent_\dim = 2$. L'encodeur convolutionnel se compose de 5 couches *Conv2D* définies avec des tailles de filtre et des pas progressivement croissants pour le sous-échantillonnage. Après les couches convolutionnelles, une couche *Flatten* est appliquée pour transformer la sortie en un vecteur 1D, qui est ensuite introduit dans une couche *Dense* comprenant 256 unités. Chaque couche *Conv2D* utilise la fonction d'activation *ReLU* (*Rectified Linear Unit*) pour introduire la non-linéarité. Pour éviter le sur-ajustement, une couche *Dropout* avec un taux de *Dropout* de 0,5 est incorporée. Le décodeur reconstruit l'entrée d'origine à partir de la représentation de l'espace latent. Sa couche d'entrée est définie avec la dimension $latent_dim$, suivie d'une couche *Dense* avec 128 × 5 × 77 unités et l'activation *ReLU*. Cette couche est remodelée en un tenseur 3D 5×77×128 pour faciliter les couches *Conv2DTranspose* suivantes. Le décodeur reflète la structure de l'encodeur, en utilisant des couches *Conv2DTranspose* avec des tailles de filtre et des pas décroissants pour suréchantillonner la représentation aux dimensions de l'image d'origine. La couche *Conv2DTranspose* finale génère l'image reconstruite à l'aide d'une fonction d'activation sigmoïde. Le processus de formation s'est étendu sur 20 époques avec une taille de lot de 32.

5.2 Résultats pour les images composites à 5 descripteurs

Stratégie 1 : La figure 4 montre la distribution de probabilité cumulée de l'erreur de reconstruction lors de l'utilisation d'une image composite à 5 caractéristiques. L'axe des abscisses représente l'erreur de reconstruction et l'axe de coordonnée représente la probabilité cumulée d'événements normaux et anormaux. Comme le montre le graphique, l'erreur de reconstruction est plus faible pour les événements normaux, et la probabilité cumulée atteint presque 1 avec une valeur d'erreur relativement faible (≈2,5%). En revanche, pour les événements anormaux, l'erreur de reconstruction est plus élevée. La distance entre les deux courbes indique l'efficacité du CVAE.

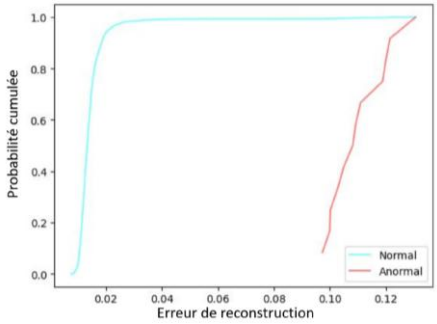


Figure 4. Erreur de reconstruction des images à 5 descripteurs

Stratégie 2 : La base de données a été divisée en parties égales pour l'inclusion de défaillances synthétiques qui incluent le biais, l'étincelle, le gel, le bruit et la saturation. Le modèle a été formé en utilisant 75% des données et les 25% restants ont été utilisés pour les tests. La figure 5 montre que les différents types d'images de la base de données sont regroupés dans l'espace latent. Le nom des axes est noté LD 1, 2 et 3, où LD signifie dimension latente. Nous avons la région des images normales, ainsi que chaque groupe d'images de défaillances synthétiques. Les signaux défaillants réels apparaissent dans différentes zones de type de défaillance. Après la visualisation des données dans l'espace latent, les coordonnées des images ont été réduites et centralisées pour calculer l'indice de santé. Les résultats, présentés dans la figure 6, montrent que la distance entre chaque image étiquetée comme anormale et le centre du groupe normal est supérieure au seuil défini par l'indice de santé. De plus, la distance entre chaque image anormale et le centre du groupe d'images gelées est inférieure au seuil défini par l'indice de santé.

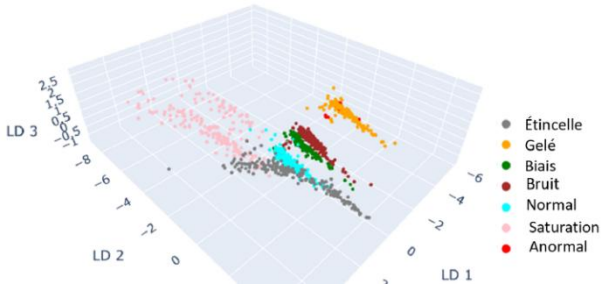


Figure 5. Espace latent des images à 5 descripteurs

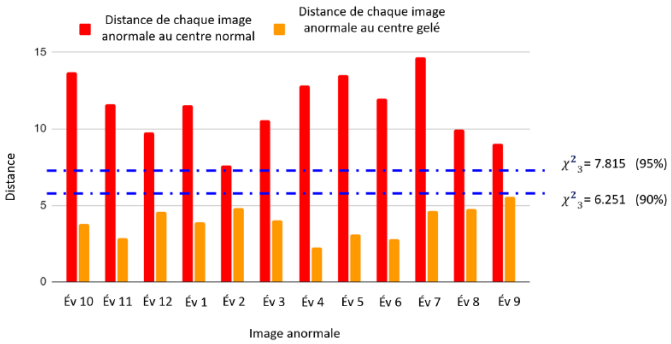


Figure 6. Distance entre une image anormale et les centres des groupes normal et gelé pour des images à 5 descripteurs

5.3 Résultats pour les images composites à 6 descripteurs

Stratégie 1 : La figure 7 montre la distribution de probabilité cumulée pour les images à 6 descripteurs, en ajoutant les corrélations aux descripteurs statistiques précédents. Les tendances observées sur cette figure sont similaires à celles avec 5 descripteurs. Pour les événements normaux, la probabilité cumulée augmente rapidement et atteint presque 1,0 avec une erreur de reconstruction d'environ 0,05. Les deux courbes montrent une distinction entre les événements normaux et anormaux, et l'erreur de reconstruction est significativement plus grande pour les événements anormaux, nous permettant de distinguer les deux classes.

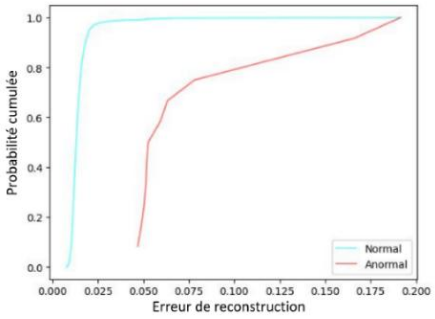


Figure 7. Erreur de reconstruction des images à 6 descripteurs

Stratégie 2 : D'après les résultats dans la figure 8, nous pouvons voir que la qualité de l'espace latent n'est pas meilleure que celle avec uniquement les cinq premiers descripteurs. La figure 9 présente les résultats de l'indice de santé dans l'espace latent des images à 6 descripteurs. On observe une baisse de qualité des prédictions dans cet espace, car il existe une région où ils cohabitent différents types d'événements avec différents types de défaillances dans leurs capteurs. Malgré cela, les événements liés à des capteurs défectueux sont correctement localisés dans la région des capteurs gelés. Bien que la qualité de l'espace latent utilisant des images à 6 descripteurs ne soit pas la même que celle du modèle utilisant des images à 5 descripteurs, l'indice de santé fonctionne.

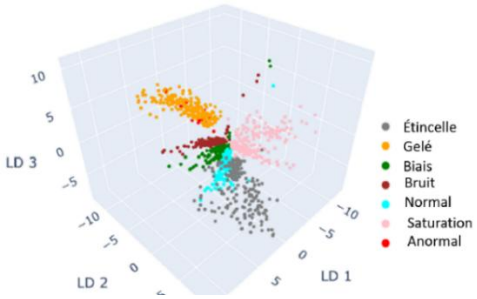


Figure 8. Espace latent des images à 6 descripteurs

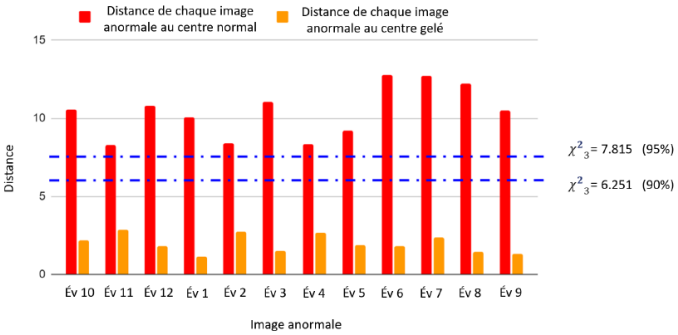


Figure 9. Distance entre une image anormale et les centres des groupes normal et gelé pour des images à 6 descripteurs

5.4 Comparaison de la méthode proposée avec la technique de déformation temporelle dynamique DWT

Compte tenu des performances peu satisfaisantes de l'ajout des informations de corrélation par le 6ème descripteur, nous comparons ici les performances obtenues avec la méthode DTW qui mesure la déformation entre les signaux.

Des tests ont été réalisés avec le type de défaillance synthétique de type étincelle. Les résultats sont représentés dans l'histogramme de la figure 10.

Nous remarquons que les distances DTW entre les signaux sains et les signaux altérés par des étincelles sont très similaires, sans différence significative. La technique DTW ne donne pas de bons résultats pour détecter les défaillances dans les signaux de

notre base de données. Cela suggère que cette méthode n'est pas adéquate dans notre contexte particulier, et nous pousse à investiguer d'autres options.

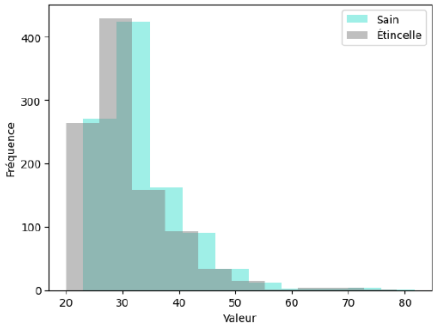


Figure 10. Histogramme des résultats de la DWT avec les échantillons 'étincelle' et 'sain'

6 Conclusion

Ce travail présente une nouvelle méthodologie pour la détection automatisée des défaillances de capteurs dans les systèmes aéronautiques. En combinant l'extraction de descripteurs statistiques, leur conversion en images et des techniques avancées d'apprentissage profond, cette méthode permet une détection précise des événements anormaux. Les images basées sur des descripteurs statistiques facilitent l'analyse des conditions du système à partir des signaux des capteurs et l'architecture CVAE gère efficacement la compression et la reconstruction des données. La validation expérimentale a montré que le modèle parvient à distinguer efficacement les événements normaux des défaillances de capteurs.

Les perspectives incluent l'intégration de nouvelles fonctionnalités basées sur les LSTMs et les CNNs afin d'affiner la détection, ainsi que l'extension de l'adaptabilité du modèle à différents scénarios opérationnels. La validation de l'approche sur d'autres bases de données industrielles représente également un objectif essentiel. Cette méthodologie ouvre la voie à des systèmes de détection plus performants et mieux adaptés aux environnements industriels complexes.

7 Remerciements

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements au Laboratoire en Intelligence de Données (LID) pour l'environnement de travail stimulant. Nous adressons également notre profonde gratitude au personnel du partenaire industriel pour sa disponibilité, ainsi qu'à MITACS pour le soutien financier qui a rendu possible la réalisation de ce travail.

8 References

Ali, A. M. A., Tawfik, E. Z., Shaeb, M., & Mousbah. (2023). Sensor-to-sensor networking concepts based on local mobile agent platform. *International Journal of Advances in Engineering and Management*, *5*(5), 199–204.

Bordoni, F., & D'Amico, A. (1990). Noise in sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, *21*(1-3), 17–24.

Balaban, E., Saxena, A., Bansal, P., Goebel, K. F., & Curran, S. (2009). Modeling, detection, and disambiguation of sensor faults for 707 aerospace applications. *IEEE Sensors Journal*, *9*(10), 1907–1917.

Bailly, R. (2023). *Apprentissage auto-supervisé pour la détection d'anomalies dans des séries temporelles*, Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes.

Chen, Y., Gou, L., Li, H., & Wang, J. (2022). Sensor fault diagnosis of aero engine control system based on honey badger optimizer. *IFAC-PapersOnLine*, *55*(3), 228–233.

Dang, Q. K., & Suh, Y. S. (2014). Sensor saturation compensated smoothing algorithm for inertial sensor-based motion tracking. *Sensors*, *14*(5), 8167–8188.

de Silva, B. M., Callaham, J., Jonker, J., Goebel, N., Klemisch, J., McDonald, D., Hicks, N., Nathan Kutz, J., Brunton, S. L., & Aravkin, A. Y. (2021). Hybrid learning approach to sensor fault detection with flight test data. *AIAA Journal*, *59*(9), 3490–3503.

Gunduz, H. (2021). An efficient dimensionality reduction method using filter-based feature selection and variational autoencoders on Parkinson's disease classification. *Biomedical Signal Processing and Control*, *66*, 102452.

Jan, S. U., Saeed, U., & Koo, I. (2020). Machine learning for detecting drift fault of sensors in cyber-physical systems. *IEEE Sensors Journal*, *20*, 389–394.

Javaid, A., Niyaz, Q., Sun, W., & Alam, M. (2016). A deep learning approach for network intrusion detection system. In *BIONETICS'16: Proceedings of the 9th EAI International Conference on Bio-inspired Information and Communications Technologies* (pp. 21–26).

Jadidi, Z., Muthukkumarasamy, V., Sithirasenan, E., & Sheikhan, M. (2013). A deep learning approach for network intrusion detection system. In *ICDCS'13: 2013 IEEE 33rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops* (pp. 76–81).

Kim, T. Y., & Cho, S. B. (2018). Web traffic anomaly detection using C-LSTM neural networks. *Expert Systems with Applications*, *106*, 66–76.

Kim, S. G., Chae, Y. H., & Seong, P. H. (2019). Signal fault identification in nuclear power plants based on deep neural networks. *Annals of DAAAM and Proceedings*, *30*.

Kraiem, I. B. (2021). *Détection d'anomalies multiples par apprentissage automatique de règles dans les séries temporelles*, Thèse de doctorat, Université de Toulouse-Jean Jaurès.

Kingma, D. P., & Ba, J. (2014). *Adam: A method for stochastic optimization* (arXiv:1412.6980).

Li, D., Wang, Y., Wang, J., Wang, C., & Duan, Y. (2020). Recent advances in sensor fault diagnosis: A review. *Sensors and Actuators A: Physical*, *309*, 111990.

Li, C., & Li, Y. (2013). A spike-based model of neuronal intrinsic plasticity. *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, *5*(1), 62–73.

Moreno Haro, L. M., Tahan, A., & Agard, B. (2023). *Aperçu des méthodes de prédiction de pannes*. CIGI Qualita MOSIM, Trois-Rivières, Québec, Canada.

Moreno Haro, L. M. (2024). *Développement d'une méthode pour la détection d'anomalies dans des signaux de capteurs : application dans des systèmes aéronautiques*, Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal.

Reddy, G. N. K., Manikandan, M. S., & Murty, N. N. (2020). On-device integrated PPG quality assessment and sensor disconnection/saturation detection system for IoT health monitoring. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, *69*(9), 6351–6361.

Takai, S. (2021). A general framework for diagnosis of discrete event systems subject to sensor failures. *Automatica*, *129*, 109669.

Zidi, S., Moulahi, T., & Alaya, B. (2018). Fault detection in wireless sensor networks through SVM classifier. *IEEE Sensors Journal*, *18*(1), 340–347.

Zhao, Z., Sun, Y.-G., & Zhang, J. (2016). Fault detection and diagnosis for sensors in an aero-engine system. *Journal Name*, *1*(1), 2977–2982.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Reclassification des Données de Maintenance par les LLMs : Impact sur l'Évaluation Statistique de la Fiabilité des Systèmes

MATHIEU PAYETTE[1], GEORGES ABDUL-NOUR[1], TOUALITH JEAN-MARC MEANGO[2], MIGUEL DIAGO[2], ALAIN CÔTÉ[2]
[1] Université du Québec à Trois-Rivières
3351, boulevard des Forges, Trois-Rivières, G8Z-4M3, Québec, Canada
mathieu.payette@uqtr.ca, georges.abdulnour@uqtr.ca
[2] Hydro-Québec
1800, boulevard Lionel-Boulet, Varennes, J3X-1S1, Québec, Canada
Meango.ToualithJean-Marc@hydroquebec.com, DiagoMartinez.Miguel3@hydroquebec.com, cote.alain7@hydroquebec.com

Résumé – La maintenance joue un rôle crucial dans la gestion des actifs en garantissant la disponibilité et la fiabilité des équipements. Cependant, les méthodes quantitatives guidant la prise de décision reposent sur des données opérationnelles souvent inexactes ou ambiguës. Des approches préventives limitent ces erreurs à la source, mais cela ne peut garantir l'élimination complète des erreurs. Ainsi, il est primordial de développer de moyens correctifs de reclassification, qui serviront à revaloriser les données historisées. Cette recherche vise à évaluer l'impact des approches correctives, en comparant des analyses de fiabilité avant et après l'application d'un modèle de classification à partir de Grands Modèles de Langage (GML/LLMs). Une étude de cas portant sur des transformateurs de puissance d'un réseau électrique canadien permet d'établir des mesures statistiques sur les données de maintenance. L'estimation des paramètres d'un Processus de Poisson Non-Homogène (NHPP) fournit des indicateurs de fiabilités d'un système réparable, puis une analyse statistique compare les distributions avant et après le traitement. Les résultats démontrent un impact significatif de la reclassification des données, mettant en évidence la nécessité de développer des méthodes correctives pour améliorer la fiabilité des analyses et la robustesse des décisions en maintenance et gestion des actifs.

Abstract – Maintenance plays a crucial role in asset management, ensuring equipment availability and reliability. However, the quantitative methods used to guide decision-making are based on operational data that is often inaccurate. Preventive approaches limit these errors at the source but cannot guarantee their complete elimination. It is therefore essential to develop corrective measures, which will serve to enhance the value of historical data. This study aims to assess the impact of corrective approaches, by comparing reliability analyses before and after the application of a classification model based on large language models. A case study of power transformers in a Canadian power grid is used to establish statistical measures on maintenance data. Parameter estimation of a Non-Homogeneous Poisson Process (NHPP) provides indicators of the reliability of a repairable system, and statistical analysis compares distributions before and after treatment. The results demonstrate a significant impact of data cleaning, highlighting the need to develop corrective methods to improve the reliability of analyses and the robustness of maintenance and asset management decisions.

Mots clés – **Fiabilité, Maintenance, Intelligence Artificielle, Grands Modèles de Langage (GML), Qualité des données**
Keywords – **Reliability, Maintenance, Artificial Intelligence, Large Language Models (LLMs), Data Quality**

1 INTRODUCTION

La gestion des actifs (GDA) est une activité fondamentale pour l'optimisation des ressources d'une entreprise. En effet, cette discipline a pour but de maximiser la valeur tirée d'un actif, tout au long de son cycle de vie (Institute of Asset Management, 2024; Institute of Public Works Engineering Australasia, 2015; International Organization for Standardization, 2024). Pour les grandes infrastructures telles que les réseaux électriques, la maintenance des actifs est cruciale pour assurer la performance, la fiabilité et la longévité des actifs. Une planification efficace des travaux est hautement dépendante de l'information et des données sur l'entretien de ces actifs. En effet, les techniques analytiques pour planifier les actions préventives sont basées sur l'examen des données historisées dans les logiciels de gestion de la maintenance.

De nombreux travaux ont exploré les raisons derrière les erreurs de saisies, ainsi que des moyens pour les prévenir, en agissant à la source (Molina et al., 2013; Murphy, 2009; Sexton et al., 2019; Unsworth et al., 2011). Une des causes observées de ces erreurs vient du fait que les systèmes de saisie sont souvent présentés sous forme de formulaire muni de multiples menus déroulants, avec de longues listes de choix. Les opérateurs ont tendance à choisir les premières options, ou les options « divers/autres », résultantes en une mauvaise classification des données (Sexton et al., 2017), et préfèrent fournir les explications par le biais des champs de texte libre (Sexton et al., 2019). Cela met en évidence la nécessité de développer des méthodes correctives, afin d'assurer

l'exactitude des données, qui constituent un élément essentiel des modèles de fiabilité. Qui plus est, ces études donnent une piste de réflexion importante en faisant ressortir la source d'information importante que contiennent les champs de textes libres. Dans cette perspective, plusieurs travaux ont été menés pour nettoyer les données textuelles (Payette et al., 2025a), puis pour développer des modèles pour classifier les données de maintenance (Payette et al., 2023, 2025b).

La structure de la base de données de maintenance est conçue selon des critères d'utilisations qui peuvent différer de ce qui est requis pour l'analyse de fiabilité. Par exemple, une maintenance peut être identifiée comme un entretien correctif lorsqu'un composant perd sa fonction. Or, cet évènement peut ne pas avoir d'impact direct sur la fonction principale de l'équipement. Ce type d'ambiguïté peut engendrer des difficultés à générer des modèles statistiques, lorsqu'il est nécessaire de distinguer les pannes au niveau des systèmes et sous-systèmes, nécessitant donc une reclassification des types d'actions de maintenance.

Pour y faire suite, cet article vise à utiliser un modèle de classification de texte basé sur les grands modèles de langage pour évaluer l'impact de la correction des données sur les modèles statistiques de fiabilité. Une étude de cas portant sur les transformateurs de puissance du réseau électrique d'Hydro-Québec permet d'examiner en détail l'impact des erreurs de saisie sur la qualité des données de maintenance. Dans cette analyse, des mesures statistiques sont établies afin d'évaluer la distribution et la variabilité des données avant et après l'application d'un processus de reclassification. L'estimation des paramètres d'un Processus de Poisson Non-Homogène (NHPP) est ensuite réalisée pour modéliser la fiabilité d'un système réparable, offrant ainsi une vision quantitative des effets du nettoyage des données sur les prédictions des modèles de défaillance. Une analyse comparative des distributions statistiques avant et après reclassification met en évidence les écarts induits par les erreurs de saisie et de classification différente. Les résultats obtenus soulignent non seulement l'importance du nettoyage des données dans l'amélioration des analyses de fiabilité, mais aussi la nécessité de développer des approches correctives robustes pour garantir l'exactitude et la pertinence des modèles décisionnels.

Dans un premier temps, une revue de littérature est proposée pour décrire les méthodes quantitatives liées à la fiabilité avec une emphase sur l'analyse des systèmes réparables. Puis, la qualité des données de maintenance est étudiée dans une revue des travaux existants sur la correction des données et l'application du traitement automatique du langage naturel (TALN) dans le domaine de la maintenance. La section suivante décrit en détail la méthodologie proposée ainsi que les modalités de l'étude de cas, c'est-à-dire, le processus de correction des données et l'estimation des paramètres du modèle de fiabilité. Les résultats de ces analyses statistiques et leur interprétation sont ensuite analysés. Enfin, la dernière section propose une discussion sur les implications des résultats et une conclusion sur les perspectives d'amélioration et les futures recherches.

2 Revue de la Litterature

2.1 Modèles de fiabilité en maintenance

Pour débuter, la fiabilité est la probabilité qu'un système fonctionne pendant une certaine période et dans certaines conditions prédéfinies (Lazzaroni et al., 2011; Wildi, 2005). L'étude de la fiabilité se concentre sur la prévention et la réduction de la fréquence des défaillances, grâce à l'analyse statistique des données. Un système non réparable se caractérise par sa probabilité de survie et son temps moyen avant défaillance. Pour modéliser son comportement, on utilise fréquemment la distribution de Weibull et la distribution exponentielle (O'Connor & Kleyner, 2011). Un système réparable est généralement modélisé en fonction d'hypothèses sur l'efficacité des tâches de maintenance (réparation parfaite, réparation minimale, etc.). Lorsque l'on considère une maintenance parfaite, c'est-à-dire que l'appareil est remis à neuf, le modèle du Processus de Poisson Homogène (HPP) est approprié. Dans ce cas, le taux de défaillance est constant et les pannes arrivent selon une distribution exponentielle. En revanche, le modèle NHPP, en anglais *« Non-Homogeneous Poisson Process »* prend en compte la réparation minimale. La fonction d'intensité ($\lambda(t)$) peut donc varier en fonction de l'âge de l'équipement (Gámiz et al., 2011; Leemis, 2009). Pour obtenir une estimation des paramètres du modèle NHPP, il suffit d'appliquer une courbe d'ajustement à la fonction cumulative moyenne ou *« Mean Cumulative Function »* (Nelson, 2003; Reid, 2022).

2.2 TALN pour l'amélioration des données de maintenance

Lors d'une analyse statistique de fiabilité, l'événement étudié est la défaillance, tant pour un système réparable que non réparable. Il est donc primordial de bien distinguer les travaux de maintenance préventifs des actions correctives qui surviennent à la suite d'une perte de fonction du système. Une classification erronée des travaux de maintenance conduits à une évaluation biaisée des taux de défaillance, compromettant ainsi la précision des analyses et menant à des décisions inexactes.

Le traitement automatique du langage naturel est une discipline issue de l'intelligence artificielle (IA) qui a pour but la compréhension du langage humain par la machine (Beysolow II, 2018). Un élément important du TALN est la modélisation mathématique du texte. Celle-ci a évolué des approches vectorielles basées sur la fréquence des mots (Beysolow II, 2018; Thanaki, 2017), à des représentations statiques générées par apprentissage profond et, plus récemment, à des représentations contextuelles, portées par les méthodes de *« Transformers »* (Liu et al., 2020; Ravichandiran, 2021; Vaswani et al., 2017). Les méthodes les plus performantes pour l'encodage du texte sont sans contredit celles basées sur les modèles de *« Transformers »*. En effet, contrairement aux modèles de représentation comme *« word2vec »* et *« FastText »*, aussi basés sur des réseaux de neurones, ces modèles sont dotés d'un mécanisme *« d'Attention »* qui permet une interprétation contextuelle du texte (Liu et al., 2020; Ravichandiran, 2021).

La classification est une méthode commune d'apprentissage automatique. Le TALN tire profit de ces techniques en catégorisant les textes et/ou des éléments de textes, à partir des représentations vectorielles. Il s'agit d'une application d'importance pour le traitement des textes de maintenance, et la littérature présente déjà plusieurs succès dans son application. Ces applications se distinguent par la manière d'encoder le texte et par la façon dont sont construits les classificateurs. Le choix du type d'apprentissage, supervisé ou non, est dicté par les besoins de modélisation et par la facilité d'obtenir des données étiquetées.

Par exemple, des méthodes simples, basées sur l'occurrence des mots, ont notamment été appliquées pour la représentation des textes de maintenance. En comptabilisant les mots appartenant à une catégorie, un score est établi et les

ordres sont associés à la classe majoritaire (Nojedehi et al., 2021). D'un autre côté, l'encodage peut être combiné à des méthodes d'apprentissage non supervisé, comme le *clustering*, pour classifier les requêtes de maintenance (Gunay et al., 2019). Des méthodes d'apprentissage supervisé et non supervisé peuvent aussi être utilisées conjointement pour le développement de modèle de classification. L'allocation de Dirichlet latente (LDA), une technique de modélisation des sujets, a notamment été appliquée à cet effet (Hu et al., 2024; Y. Li et al., 2024). Ensuite, plusieurs applications utilisent les techniques d'apprentissage supervisé, notamment pour la classification automatique des interventions (Bouabdallaoui et al., 2020), la priorisation des actions (D'Orazio et al., 2024) et l'analyse des événements de maintenances (Bikaun & Hodkiewicz, 2021).

Une autre application importante pour le domaine de la maintenance est l'extraction des connaissances. Les applications les plus populaires du domaine sont la reconnaissance d'entités nommées, ou *« NER »*. Ces techniques ont notamment été appliquées pour déterminer les actions de maintenance exécutées et l'objet impliqué (Giordano & Fantoni, 2025) ou bien pour déterminer l'objet, le problème et la solution lors d'opération de maintenance (H. Li et al., 2021; Navinchandran et al., 2019; Sexton et al., 2017). La reconnaissance d'entités est une application de classification appliquée à des parties de texte (jeton, groupe de mots, etc.).

L'emploi des techniques TALN permet d'améliorer et de structurer les données et d'extraire de l'information pour supporter la prise de décision. Les travaux récents montrent des avancées significatives dans l'extraction et la classification des informations, l'affectation des tâches et la recherche sémantique. Ce travail de recherche a pour but de démontrer la pertinence de ces outils par une analyse de leur effet sur l'estimation de la fiabilité. La section suivante présentera la méthodologie mise en œuvre.

3 Methodologie

3.1 Données utilisées

Au Québec, la société d'État Hydro-Québec (HQ) produit, transporte et distribue de l'électricité dans toute la province. Son réseau de transport s'étend sur plus de 34 000 km de lignes et compte plus de 500 postes électriques (Hydro-Québec, 2025). Pour cette analyse, les données saisies par les techniciens dans le système de gestion de la maintenance seront analysées. L'actif choisi pour l'exercice est le transformateur de puissance, un élément majeur du réseau de transport. Comme un modèle de classification précédemment développé sera utilisé, l'étude portera sur les ordres de maintenance émis après 2022 qui n'ont pas été utilisés pour l'entraînement (Payette et al., 2025b). Compte tenu de l'ampleur du réseau, cela représente tout de même quelques milliers de bons de travail réalisé. De plus, par la configuration du système, des ordres de maintenance sont définis comme correctifs lorsqu'une des fonctions du système est perdue. Par exemple, l'huile d'un transformateur a une fonction d'isolation ; la perte de cette fonction n'entraîne pas forcément une panne du système, mais la maintenance est tout de même identifiée comme une action corrective. Afin de préserver la confidentialité des informations fournies par l'entreprise, un facteur de mise à l'échelle est appliqué à la série de données.

3.2 Processus de correction des données par TALN

La correction des données repose sur un modèle de classification de texte utilisant une architecture basée sur le grand modèle de langage BERT en version française pour la représentation vectorielle. La classification est réalisée à l'aide d'un réseau de neurones profond entraîné avec la bibliothèque Python SparkNLP , plus précisément avec le module *« ClassifierDL »*. Une description détaillée de la méthodologie et des résultats est disponible dans l'article correspondant (Payette et al., 2025b). Le modèle prend en entrée les textes issus des ordres de maintenances et effectue une classification binaire pour déterminer si la description fournie désigne ou non un événement de défaillance et/ou des actions correctives. Ces événements de défaillances sont définis comme la perte de la fonction électrique de transformation entrainant son indisponibilité. Bien qu'un modèle multiclasses offre une analyse plus détaillée des différents types de maintenance, l'objectif de ce travail est de soutenir la modélisation de la fiabilité, laquelle repose sur l'identification des événements de défaillance. Une classification binaire permet de simplifier cette tâche tout en fournissant les informations nécessaires à cette application.

3.3 Modélisation de la fiabilité

Une fois les données de maintenance classifiées et les événements de défaillance identifiés, ces résultats sont alors utilisés pour déterminer des métriques quant à la fiabilité de l'actif. Pour ce faire, la bibliothèque *« Python » « reliability »* est employée, notamment les modules concernant les équipements réparables (Reid, 2022). En effet, un transformateur de puissance est un actif réparable. Une défaillance cause une perte de fonction du système, mais le remplacement des composants fautifs permet de rétablir ces fonctions. Comme discuté dans la revue de littérature, le choix de la méthode statistique dépend des hypothèses quant à la qualité de la maintenance. Dans le cas présent, le système est modélisé suivant un Processus de Poisson Non-Homogène (NHPP), signifiant que le système est remis dans un étant de fonctionnement similaire à son état avant la défaillance. Dans un premier temps, une estimation non paramétrique de la fonction cumulative moyenne (MCF) est calculée pour produire les graphiques comparatifs, puis un ajustement à la courbe est effectué pour obtenir une estimation des paramètres NHPP sous la forme :

$$MCF(t) = \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}$$

Où α désigne le paramètre d'échelle et β le paramètre de forme de la fonction. Ces paramètres permettront de calculer le temps moyen entre les défaillances (MTBF) et le temps médian entre les défaillances. Cette procédure est effectuée pour les données avant et après la reclassification et les métriques décrites dans cette section sont ensuite comparées.

4 Resultats et Discussion

Cet article évalue l'impact de la correction des données de maintenance sur les modèles de fiabilité. Cette section détaille les résultats obtenus de l'étude de cas sur les transformateurs de puissance d'Hydro-Québec. Dans un premier temps, les résultats de la classification seront brièvement discutés, puis l'analyse de fiabilité servira de point de comparaison pour quantifier l'effet des erreurs de saisies.

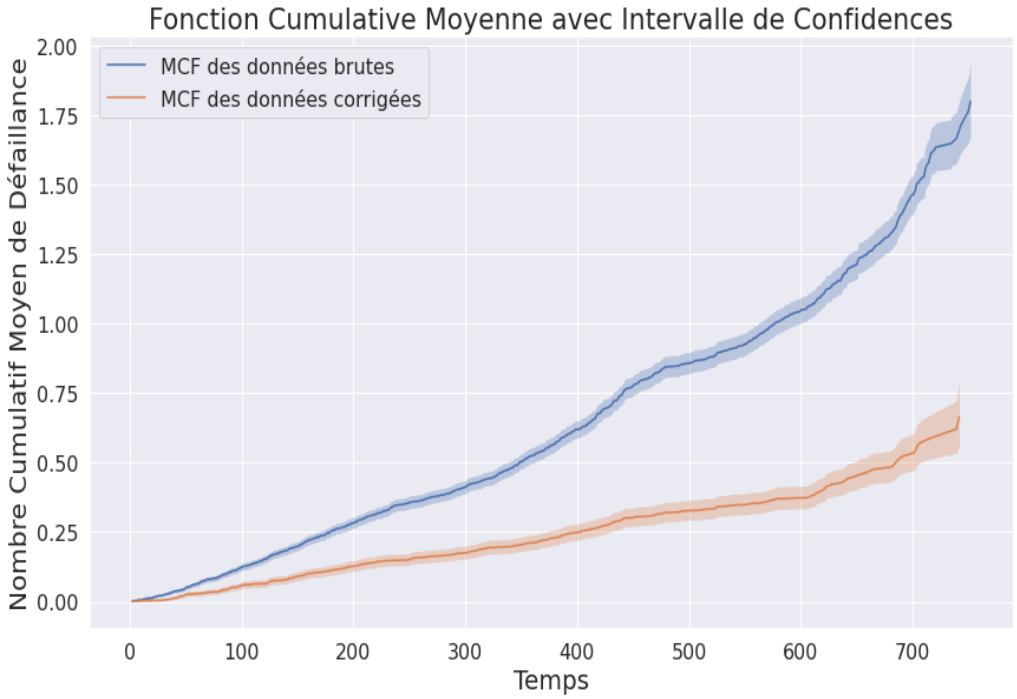


Figure 1: Comparaison des fonctions cumulatives moyennes anonymisées avec et sans reclassification

4.1 Amélioration de la qualité des données

La première étape de la démarche est de classifier les données de maintenance en fonction de l'information contenue dans le texte libre. Lors de l'entraînement du modèle de classification, la performance a été évaluée à plus de 90%, tant pour la précision, le rappel et le score F1, tant sur les échantillons de validation et de tests (Payette et al., 2025b). Ces résultats démontrent la capacité de généralisation du modèle et laissent donc croire que la performance sera similaire sur l'échantillon utilisé dans cette étude. Comme mentionné précédemment, cet échantillon porte sur une période d'un peu plus deux ans, soit de 2022 à 2024 inclusivement. Le classificateur prend en entrée les ordres de maintenance saisie à l'origine comme des actions correctives, et réattribue une étiquette si le texte est jugé comme une maintenance corrective ou non. Dans ce cas-ci, le réseau de neurones a déterminé que seulement 30% des actions saisies comme correctives correspondaient à des actions correctives avec perte de la fonction de transformation électrique. En observant les entrées discriminées, il est constaté qu'un nombre important de textes désignent le changement du dessiccant, une substance qui a pour fonction de contrôler l'humidité dans le réservoir d'huile. Le changement du dessiccant est fait lorsqu'un changement de sa couleur est observé, il s'agit donc par définition d'une action de maintenance conditionnelle. Cependant, comme il y a une perte de la fonction d'isolation électrique, elle peut être considérée par les opérateurs comme une action corrective. Cela suggère qu'il y a des ambiguïtés dans l'interprétation des définitions des types de maintenance et la reclassification des données aura un impact considérable, selon le sujet de l'étude de fiabilité. Une étude approfondie des différences d'étiquetage serait de mise, et permettrait de donner une rétroaction pertinente à l'ensemble des techniciens de maintenance.

4.2 Effet sur les modèles de fiabilité

Une fois les données déclassifiées, la fonction moyenne cumulative démontre la différence entre les courbes, avant et après la reclassification, telle que présentée à la Figure 1.

Ces fonctions indiquent le nombre cumulatif d'occurrences des événements correctifs au fil du temps. En d'autres termes, cela représente le nombre moyen de réparations du système en fonction du temps. Dans les deux cas, les courbes démontrent une augmentation des défaillances au fil du temps, ce qui signifie que le système est en vieillissement. La courbe des données corrigées révèle cependant un vieillissement beaucoup moins rapide, comparativement à l'autre courbe. En effet, la différence entre les deux fonctions est évidente.

En appliquant un ajustement à chacune de ces courbes, les paramètres d'un modèle NHPP sont obtenus. L'ajustement des courbes est géré directement par la bibliothèque *« reliability »*, qui à son tour appelle la fonction de *« scipy.optimize.curve_fit »*. Celle-ci fait un ajustement à la courbe en utilisant la méthode des moindres carrée, qui minimise les écarts à l'aide de l'algorithme de Levenberg-Marquardt (Virtanen et al., 2020). Le tableau suivant présente une comparaison des métriques obtenues.

Tableau 1: Comparaison des paramètres NHPP, avant et après reclassification

Métrique	Données brutes	Données reclassifiées	% Différence
Alpha	414	896	+117%
Beta	1,36	1,18	- 13%
$MTBF_{Médian}$	248	498	+101%

Une fois de plus, ces résultats mettent en évidence les écarts significatifs entre les indices de fiabilités issus des données brutes et ceux obtenus après reclassification. Le

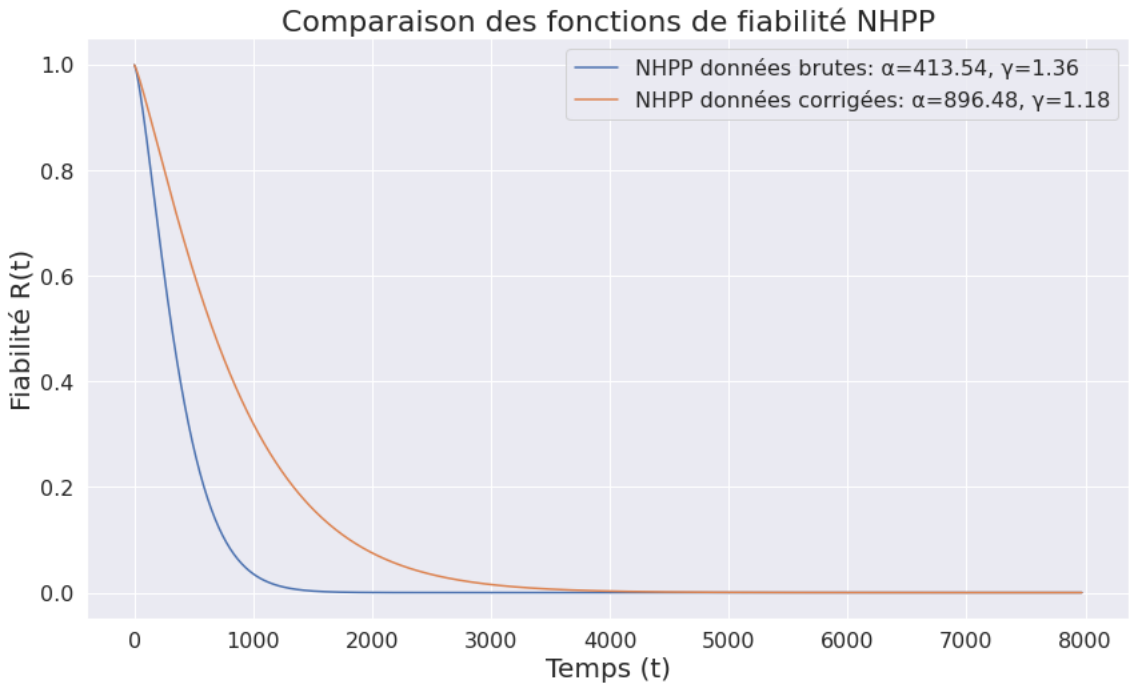


Figure 2: Courbes comparatives de la fiabilité

paramètre alpha, représentant le paramètre d'échelle de la distribution, tient compte de la dispersion des temps entre les défaillances. L'augmentation de 116% du paramètre alpha indique donc que les événements sont beaucoup plus espacés en réalité que ce qui est exprimé par les données brutes, passant de 414 à 896. Le paramètre Beta, aussi appelé paramètre de forme, indique l'état de santé à long terme du système. Par exemple, une valeur inférieure à un signifie que le taux de défaillance est en décroissance, désignant probablement la période de rodage du système. Lorsque le système est dans sa vie utile, les défaillances sont aléatoires et le paramètre β est égal à un. Enfin, s'il est supérieur à un, cela indique que le système est en fin de vie. L'évaluation de ce paramètre pour les deux échantillons démontre que le système est dans sa période de vieillissement et que les pannes sont en croissance, comme suggérée par la Figure 1. Aussi, l'usure mesurée des transformateurs apparaît comme moins rapide lorsque les données corrigées sont analysées. Une diminution de 13% sur ce paramètre est une différence notable. Avec une valeur de 1,18, cela indique que les pannes sont plus aléatoires qu'il ne le paraît et que l'effet de l'usure est un peu plus léger que prédit initialement. Enfin, la moyenne du temps entre les pannes augmente également de 101 %, passant de 248 à 498 périodes, renforçant l'idée que la correction des erreurs améliore la cohérence et la précision des analyses de fiabilité. En outre, ces résultats montrent que les données brutes contenaient vraisemblablement des erreurs qui entraînaient une sous-estimation des temps entre les défaillances et une distorsion des paramètres du modèle NHPP. En d'autres termes, les données donnent l'impression qu'il y a plus d'événements de défaillance qu'il y en a réellement.

Pour continuer, des tests statistiques sont appliqués afin de vérifier l'hypothèse que les distributions sont statistiquement différentes. La Figure 2 présente les courbes de fiabilité des deux distributions échantillonnées. Un test d'hypothèse, le test de Kolmogorov-Smirnov pour deux échantillons est appliqué. Les résultats du test démontrent que les deux distributions sont significativement différentes à une valeur-p inférieure à 5%. Cela vient donc appuyer les analyses faites dans cette section. Après reclassification, l'augmentation du temps moyen entre les défaillances et du paramètre alpha, ainsi que la diminution du paramètre beta suggèrent qu'il y avait une surestimation de l'effet du vieillissement. Ceci peut exercer une influence importante sur les politiques de maintenance, puisque l'estimation des données brutes peut mener à un intervalle des maintenances préventives plus fréquent. Après correction, le modèle laisse croire que l'entreprise pourrait adopter des politiques de maintenance préventive moins stricte, mais opter pour une approche de maintenance conditionnelle. En effet, comme le paramètre β se rapproche de 1, cela laisse penser que les défaillances sont généralement dues à des phénomènes aléatoires, plutôt qu'à l'âge des équipements. La correction des données permet donc d'obtenir une représentation plus fidèle du comportement réel des systèmes, soulignant l'importance des approches correctives pour améliorer la qualité des analyses de maintenance.

5 Conclusion et Perspectives

Ce travail met en évidence l'impact significatif que peuvent avoir la qualité des données de maintenance sur l'évaluation des modèles de fiabilité. En retour, ces modèles de fiabilité exercent une grande influence sur la prise de décision et sur les politiques de maintenance, soulignant la pertinence de développer des outils de correction des données. L'utilisation d'un modèle de classification basé sur les GML a amélioré la qualité des données et permis d'affiner l'estimation des paramètres d'un modèle NHPP. Les résultats confirment que la reclassification des données modifie de manière substantielle les mesures statistiques et réduit l'effet perçu du vieillissement sur les taux de défaillance. En effet, les résultats des analyses statistiques montrent une augmentation de 117 % du paramètre d'échelle α, une diminution de 13% du paramètre de forme β, ainsi qu'un accroissement notable du temps moyen entre défaillances médianes ($MTBF_{médian}$), passant de 248 à 498, soit une hausse de 101%. Cela illustre l'effet considérable de la reclassification des données sur la perception du comportement du système.

Bien que ces résultats soient notables, il faut tout de même demeurer prudent, puisque ces résultats sont garants de la qualité du modèle de classification. Une analyse approfondie des ordres de maintenance écartés serait de mise, tant pour faire de la prévention auprès des opérateurs que pour augmenter la confiance envers les analyses présentées. Enfin, l'approche développée ouvre la porte à de futures recherches sur l'automatisation et l'amélioration continue du traitement des données de maintenance.

6 Remerciements

Cette recherche a été soutenue par Hydro-Québec, le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et l'Université du Québec à Trois-Rivières par l'entremise de la Chaire de recherche Hydro-Québec en gestion des actifs.

Références

Beysolow II, T. (2018). Applied Natural Language Processing with Python : Implementing Machine Learning and Deep Learning Algorithms for Natural Language Processing. Apress.

Bikaun, T., & Hodkiewicz, M. (2021). Semi-automated Estimation of Reliability Measures from MaintenanceWork Order Records. PHM Society European Conference, 6(1), Article 1. https://doi.org/10.36001/phme.2021.v6i1.2950

Bouabdallaoui, Y., Lafhaj, Z., Yim, P., Ducoulombier, L., & Bennadji, B. (2020). Natural language processing model for managing maintenance requests in buildings. Buildings, 10(9). Scopus. https://doi.org/10.3390/BUILDINGS10090160

D'Orazio, M., Bernardini, G., & Giuseppe, E. D. (2024). Influence of pre-processing methods on the automatic priority prediction of native-language end-users' maintenance requests through machine learning methods. Journal of Information Technology in Construction (ITcon), 29(6), 99-116. https://doi.org/10.36680/j.itcon.2024.006

Gámiz, M. L., Kulasekera, K. B., Limnios, N., & Lindqvist, B. H. (2011). Applied Nonparametric Statistics in Reliability. Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-85729-118-9

Giordano, V., & Fantoni, G. (2025). Decomposing maintenance actions into sub-tasks using natural language processing : A case study in an Italian automotive company. Computers in Industry, 164, 104186. https://doi.org/10.1016/j.compind.2024.104186

Gunay, H. B., Shen, W., & Yang, C. (2019). Text-mining building maintenance work orders for component fault frequency. Building Research & Information, 47(5), 518-533. https://doi.org/10.1080/09613218.2018.1459004

Hu, Z., Zhang, X., & Xiong, H. (2024). Two-stage attention network for fault diagnosis and retrieval of fault logs. Expert Systems with Applications, 249, 123365. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123365

Hydro-Québec. (2025). Hydro-Québec Transénergie et équipement. https://www.hydroquebec.com/transenergie/fr/

Institute of Asset Management. (2024). Asset Management—An Anatomy. https://theiam.org/

Institute of Public Works Engineering Australasia. (2015). International Infrastructure Management Manual (IIMM). https://www.ipwea.org/resourcesnew/bookshop/iimm

International Organization for Standardization. (2024). Asset management—Vocabulary, overview and principles (ISO Standard No. 55000:2024). ISO. https://www.iso.org/standard/83053.html

Lazzaroni, M., Cristaldi, L., Peretto, L., Rinaldi, P., & Catelani, M. (2011). Reliability Engineering. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20983-3

Leemis, L. M. (2009). Reliability : Probabilistic models and statistical methods. Prentice-Hall, Inc.

Li, H., Deng, F., Lu, J., Zhang, T., & Li, H. (2021). An Application of Automatic Text Revision for Power Defect Log. Journal of Physics: Conference Series, 1757(1), 012027. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1757/1/012027

Li, Y., Liu, Y., Zhang, J., Cao, L., & Wang, Q. (2024). Automated analysis and assignment of maintenance work orders using natural language processing. Automation in Construction, 165, 105501. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105501

Liu, Z., Lin, Y., & Sun, M. (2020). Representation learning for natural language processing. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5573-2

Molina, R., Unsworth, K., Hodkiewicz, M., & Adriasola, E. (2013). Are managerial pressure, technological control and intrinsic motivation effective in improving data quality? Reliability Engineering & System Safety, 119, 26-34. https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.04.009

Murphy, G. D. (2009). Improving the quality of manually acquired data : Applying the theory of planned behaviour to data quality. Reliability Engineering & System Safety, 94(12), 1881-1886. https://doi.org/10.1016/j.ress.2009.05.008

Navinchandran, F. M., Sharp, M. E., Brundage, M. P., & Sexton, T. B. (2019). Studies to Predict Maintenance Time Duration and Important Factors From Maintenance Workorder Data. NIST. https://www.nist.gov/publications/studies-predict-maintenance-time-duration-and-important-factors-maintenance-workorder

Nelson, W. B. (2003). Recurrent events data analysis for product repairs, disease recurrences, and other applications. SIAM.

Nojedehi, P., O'brien, W., & Gunay, H. B. (2021). Benchmarking and visualization of building portfolios by applying text analytics to maintenance work order logs. Science and Technology for the Built Environment, 27(6), 756-775. https://doi.org/10.1080/23744731.2021.1913957

O'Connor, P. D. T., & Kleyner, A. V. (2011). Practical Reliability Engineering. John Wiley & Sons.

Payette, M., Abdul-Nour, G., Meango, T. J.-M., & Côté, A. (2023). Improving Maintenance Data Quality : Application of Natural Language Processing to Asset Management. In A. Crespo Márquez, J. F. Gómez Fernández, V. González-Prida Díaz, & J. Amadi-Echendu (Éds.), 16th WCEAM Proceedings (p. 582-589). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25448-2_54

Payette, M., Abdul-Nour, G., Meango, T. J.-M., Diago, M., & Côté, A. (2025a). Enhancing Maintenance Data Analytics : A Novel Failure Mode and Effect

Analysis-Natural Language Processing Integration. 71st Annual Reliability and Maintainability Symposium, Miramar Beach, Florida, USA.

Payette, M., Abdul-Nour, G., Meango, T. J.-M., Diago, M., & Côté, A. (2025b). Leveraging Natural Language Processing for Enhanced Maintenance Data in Power System Management. 51st International Conference on Computers and Industrial Engineering, Kensington Campus, UNSW Sydney, Australia.

Ravichandiran, S. (2021). Getting started with Google BERT : build and train state-of-the-art natural language processing models using BERT. Packt Publishing Ltd. http://public.eblib.com/choice/PublicFullRecord.aspx?p=6463518 https://ebookcentral.proquest.com/lib/washington/detail.action?docID=6463518 http://www.vlebooks.com/vleweb/product/openreader?id=none&isbn=9781838826239 http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=2736061

Reid, M. (2022). Reliability – a Python library for reliability engineering (Version 0.8.2) (Version v0.5.1) [Logiciel]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.3938000

Sexton, T., Brundage, M. P., Hoffman, M., & Morris, K. C. (2017). Hybrid datafication of maintenance logs from AI-assisted human tags. 2017 ieee international conference on big data (big data), 1769-1777. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8258120/

Sexton, T., Hodkiewicz, M., & Brundage, M. P. (2019). Categorization errors for data entry in maintenance work-orders. Proceedings of the Annual Conference of the PHM Society, 11. https://pdfs.semanticscholar.org/a36d/9185218392bcec3c8621cadcd83092a82bf8.pdf

Thanaki, J. (2017). Python natural language processing. Packt Publishing Ltd.

Unsworth, K., Adriasola, E., Johnston-Billings, A., Dmitrieva, A., & Hodkiewicz, M. (2011). Goal hierarchy : Improving asset data quality by improving motivation. Reliability Engineering & System Safety, 96(11), 1474-1481. https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.06.003

Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, Ł., & Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. In Advances in neural information processing systems (Vol. 30).

Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., van der Walt, S. J., Brett, M., Wilson, J., Millman, K. J., Mayorov, N., Nelson, A. R. J., Jones, E., Kern, R., Larson, E., … van Mulbregt, P. (2020). SciPy 1.0 : Fundamental algorithms for scientific computing in Python. Nature Methods, 17(3), 261-272. https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2

Wildi, T. (2005). Électrotechnique (4e édition). Presses de l'Université Laval.

Planification des opérations de Maintenance et de Renouvellement des Rails dans les Réseaux Ferroviaires Urbains

Malak Saiem[1,2], Valeria Borodin[3], Faicel Hnaien[1]
Brice Nelain[4], Hichem Snoussi[1]

[1]LIST3N, Université de Technologie de Troyes, Troyes, France
[2]Eut+, Institut de Science des Données, Union Européenne
[3]IMT Atlantique, LS2N-CNRS, La Chantrerie, 4, rue Alfred Kastler, Nantes cedex 3, F-44307, France
[4]Vossloh, 35 Rue Alfred Brinon, 69100 Villeurbanne, France

Résumé

Cet article porte sur la planification des opérations de maintenance et de renouvellement des rails, avec pour objectif l'optimisation des coûts associés. Le problème est modélisé sous la forme d'un programme linéaire en nombres entiers mixtes, intégrant diverses contraintes industrielles liées à : **(i)** la dégradation des rails, **(ii)** les limitations du temps de possession des voies, et *(iii)* la sécurité et la fiabilité du réseau. Les interventions de maintenance sont déclenchées lorsque le niveau de dégradation dépasse un seuil critique. Les modèles de prévision de l'usure et de la dégradation des rails (également appelés courbes) ont été élaborés à partir de données historiques, en prenant en compte des attributs géométriques tels que la longueur et le rayon, qui influencent la durée de vie des composants ainsi que les coûts associés. Une approche basée sur la programmation dynamique est proposée et évaluée en comparaison avec un solveur existant. Des expérimentations numériques ont été menées sur des jeux de données industrielles.

Mots-clés : Maintenance ferroviaire, planification, dégradation des rails, optimisation des coûts, renouvellement, usure verticale, usure latérale, réseau urbain, programmation dynamique, optimisation en nombre entiers mixtes.

Abstract

This contribution focuses on the planning of rail maintenance and renewal operations, aiming to optimize associated costs. The problem under study is modeled as a mixed-integer linear program, taking into account multiple industrial constraints including **(i)** rail degradation, **(ii)** time limitations related to track possession, and **(iii)** network safety. Maintenance interventions are triggered when the degradation level exceeds a critical threshold. Predictive models for rail

wear and degradation (also referred to as curves) have been developed based on historical data, based on geometric attributes such as length and radius, which influence component lifespan and associated costs. A dynamic programming-based approach is proposed and evaluated in comparison with an existing solver. Numerical experiments have been conducted on industrial instances, and managerial implications have been discussed.

Keywords: Railway maintenance, planning, track degradation, cost optimization, renewal, vertical wear, lateral wear, urban network, dynamic programming, mixed-integer programming.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Au-delà des composants, l'obsolescence des produits dans les systèmes de défense et du spatial : causes et défis.

HAROUNA DEMBA[1,3], BELGACEM BETTAYEB[2], M'HAMMED SAHNOUN[1], ANNE LOUIS[1], BENJAMIN GAILLY[3], FRANCK BESSON[3]

[1] CESI LINEACT
80 rue Edmund Halley – 76 800 Saint Etienne du Rouvray, France
{hdemba, msahnoun, alouis}@cesi.fr

[2] CESI LINEACT
8 Bd Louis XIV – 59 800 Lille, France
bbettayeb@cesi.fr

[3] DGA DID/SPQI
Caserne Xaintrailles, CS 21 152 – 33 068 Bordeaux, France
{harouna.demba, benjamin.gailly, franck.besson}@intradef.gouv.fr

***Résumé* – L'article explore les définitions, le cadre d'étude de l'obsolescence des produits et identifie ses causes principales dans la chaîne de production et la maintenance des systèmes de défense et du spatial. Il met en évidence que l'obsolescence touche l'ensemble des domaines impliqués dans la fabrication et la maintenance de ces systèmes. L'étude distingue deux grandes catégories de causes de l'obsolescence des produits : i) les causes internes qui relèvent des choix et des contraintes propres aux entreprises, ii) les causes externes qui résultent de l'environnement global dans lequel les entreprises évoluent. Une attention particulière est portée à l'obsolescence induite par les réglementations environnementales européennes, notamment la réglementation REACH, la directive RoHS et le règlement POP, qui figurent parmi les facteurs les plus impactants. Face aux défis et aux conséquences potentielles de l'obsolescence, il est donc essentiel d'adopter une approche proactive visant à anticiper les risques, garantir la pérennité et le développement de systèmes conformes, optimisés en termes de coûts et de délais, tout en préservant la souveraineté industrielle et technologique nationale.**

***Abstract* – The article explores the definitions, the framework of product obsolescence, and identify its main causes in the production and maintenance chain of defense and space systems. It highlights that obsolescence affects all areas involved in the manufacturing and maintenance of these systems. The study distinguishes two main categories of product obsolescence causes: internal causes, which are related to the choices and constraints specific to companies, and external causes, which result from the global environment in which companies operate. Special attention is given to obsolescence induced by European environmental regulations, particularly the REACH regulation, the RoHS directive, and the POP regulation, which are among the most impactful factors. In the face of the challenges and potential consequences of obsolescence, it is therefore essential to adopt a proactive approach aimed at anticipating risks, ensuring the sustainability and development of compliant systems, optimized in terms of costs and timelines, while preserving national industrial and technological sovereignty.**

***Mots clés* – obsolescence, produits, substances, causes, défis**
***Keywords* – obsolescence, products, substances, causes, challenges**

1 INTRODUCTION

L'obsolescence des composants a fait l'objet de nombreuses études dans la littérature. Ce concept, souvent analysé sous l'angle de l'obsolescence programmée (Bakker & al., 2014) ou de l'indisponibilité des composants électroniques (Sandborn, 2007), est particulièrement bien documenté dans différents secteurs tels que la défense, le spatial, l'automobile et les technologies de l'information. Les travaux de Jennings et al. (2016) ont par exemple montré comment l'obsolescence des composants électroniques affecte la durée de vie des systèmes complexes et nécessite des stratégies d'atténuation comme la gestion proactive des stocks ou la requalification de composants alternatifs.

En revanche, l'obsolescence des produits, considérés en tant que mélange de plusieurs substances, a reçu beaucoup moins d'attention. Cette problématique concerne la transition d'un produit de l'état de disponibilité à celui d'indisponibilité, en raison de la disparition de la combinaison spécifique des formulations nécessaires à sa production (International Electrotechnical Commission (IEC), 2019). Ce phénomène est particulièrement critique dans les secteurs de la défense et du spatial, où la substitution d'un produit peut être difficile en raison des performances attendues et des exigences de qualification.

Ainsi, bien que l'obsolescence des composants ait été largement étudiée, celle des produits demeure un champ de recherche encore peu exploré. Cette étude vise donc à combler cette lacune en analysant les causes principales de l'obsolescence des produits et les défis associés en s'appuyant sur la littérature existante. La problématique centrale de cette étude est donc la suivante : comment identifier et analyser les causes principales de l'obsolescence des produits ainsi que ses défis afin de mieux orienter les stratégies de résilience ? En effet, l'obsolescence des produits revêt un caractère particulièrement prégnant dans les domaines de la défense et du spatial pour plusieurs raisons :

- Ces secteurs produisent des équipements à très long cycle et durée de vie (il peut s'écouler 60 ans entre la conception d'un système et son retrait de service), par ailleurs le cycle de conception étant très long pour ces systèmes, une grande proportion des produits utilisées peut devenir obsolète avant même la mise en service de l'appareil (Nelson III & Sandborn, 2012).
- Les articles fabriqués dans ces secteurs présentent une complexité qui découle de multiples facteurs, parmi lesquels l'intégration d'un grand nombre de produits ainsi que diverses nécessités liées à la chaîne d'approvisionnement telles que la traçabilité, la coordination entre acteurs ou encore la circulation de l'information.
- L'obsolescence non maîtrisée peut affaiblir la compétitivité des entreprises nationales et menacer la souveraineté industrielle et technologique d'un pays. Une Base Industrielle et Technologique de Défense (BITD) fragilisée devient alors dépendante de technologies étrangères, ce qui peut poser des risques stratégiques en cas de crise ou de tensions géopolitiques. Ainsi, il est donc nécessaire de protéger la souveraineté nationale et maintenir la compétitivité des industries de la BITD.

La contribution de cette étude est double : d'une part, elle met en lumière une forme d'obsolescence encore peu couverte dans la littérature, en insistant sur la dimension « produit » au-delà des composants électroniques ; d'autre part, elle propose une analyse structurée visant à mieux comprendre les causes et les défis de cette obsolescence, dans l'objectif de formuler des pistes d'actions concrètes. La méthodologie adoptée repose ainsi sur deux étapes complémentaires :

1. Une revue et une classification des causes principales de l'obsolescence des produits identifiées dans la littérature.
2. Une analyse des défis que ces causes soulèvent pour les industriels.

Cette approche a pour objectif, en croisant causes et défis, d'identifier les leviers de résilience à activer pour anticiper l'obsolescence des produits.

Cet article est composé, tout d'abord d'une section sur les définitions des termes clés de l'étude et son cadre, ensuite d'une section sur les causes principales de l'obsolescence des produits évoquées dans la littérature, d'une troisième section basée sur les éléments de compréhension de l'obsolescence causée par les réglementations sur les substances chimiques, causes des plus impactantes de l'obsolescence des produits (Souifi & Zolghadri, 2024) et enfin d'une section sur les défis liés à l'obsolescence des produits.

2 DEFINITIONS ET CADRAGE DE L'ETUDE

2.1 Obsolescence

L'obsolescence, selon la norme IEC 62402:2019, est la transition de l'état de disponibilité à l'état d'indisponibilité d'une entité (ici : un produit, voir définition ci-après) auprès de son fabricant conformément à la spécification d'origine (International Electrotechnical Commission (IEC), 2019).

La norme utilise le mot obsolète pour désigner une entité qui n'est plus disponible pour différentes raisons et le mot obsolescent pour une entité soumise à l'annonce d'une future fin de disponibilité. Selon cette norme, ces termes ne désignent donc pas la perte d'utilité d'une entité mais son indisponibilité et ils ne se différencient que par un écart temporel (l'entité est obsolescente avant de devenir obsolète) (International Electrotechnical Commission (IEC), 2019).

2.2 Produit

Le terme produit est défini dans cette état de l'art selon la définition de la réglementation européenne environnementale REACH (Parlement Européen et du Conseil, 2006), laquelle définie également la notion de « substance » nécessaire à la compréhension du terme « produit » et la notion d'« article » nécessaire à la différenciation des termes « produit » et « article ».

- Substance : est un élément chimique et ses composés à l'état naturel ou le résultat d'un procédé de fabrication.

Dans un procédé de fabrication, une réaction chimique est généralement nécessaire pour former une substance (European Chemicals Agency, n.d). Le procédé de fabrication d'une substance est illustré dans la Figure 1. La substance C est une substance résultant de la réaction des substances A et B (exemples : métaux, solvants comme l'acétone, colorants et pigments, diesel et autres carburants, …).

Figure 1. Procédé de fabrication d'une substance (European Chemicals Agency, n.d)**.**

- Produit : un mélange ou une solution composé de deux substances ou plus (European Chemicals Agency, n.d). La Figure 2 illustre cette notion de produit où les substances A et B sont mises en présence l'une de l'autre et ne réagissent pas pour former une autre substance (exemples : shampoings et savons, parfums, détergents, peintures, matériaux …).

Figure 2. Représentation d'un produit (European Chemicals Agency, n.d)**.**

Il existe deux types principaux de mélange :

- Mélanges hétérogènes : les différentes substances sont visibles et distinctes les unes des autres, comme dans le cas d'un béton, où les granulats, l'eau et le ciment forment un mélange mais sont discernables ;
- Mélanges homogènes : les substances sont mélangées de manière uniforme, formant un seul corps, comme dans une solution métallique (alliage), un verre, un parfum où les éléments sont répartis de manière régulière.

- Article : est défini comme un objet auquel est donné, au cours du processus de fabrication, une forme, une surface ou un dessin particulier qui est plus déterminant pour sa fonction que sa composition chimique (European Chemicals Agency, n.d). La Figure 3 illustre cette notion d'article où les substances A et B sont mises en présence l'une de l'autre, ne réagissent pas et une forme est donnée (exemples : visserie, guitares, batteries, T-shirts, CDs, …).

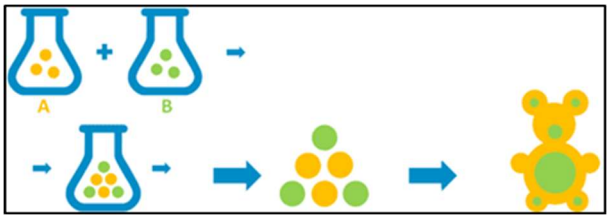


Figure 3. Représentation d'un article (European Chemicals Agency, n.d)**.**

Le synoptique dans la Figure 4 permet de schématiser le passage de substance à produit et de produit à article.

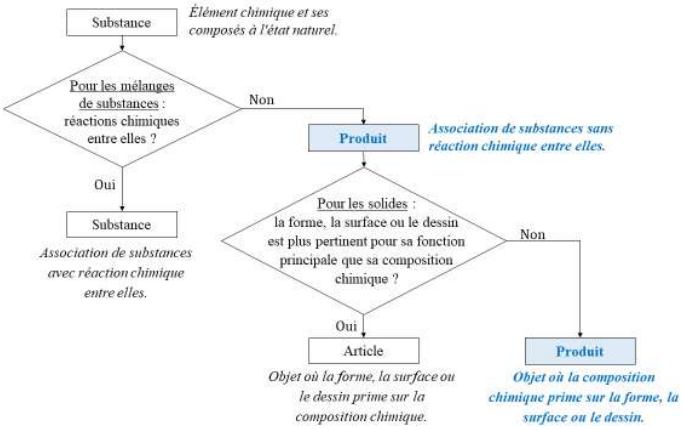


Figure 4. Synoptique Substance-Produit-Article au sens de la règlementation REACH.

Ainsi, des poudres, un fil de soudure, des granulés, des cristaux, des métaux sous forme de lingot sont, lorsqu'ils ne sont pas des substances, considérés comme des produits car c'est la composition chimique qui prime pour l'utilisateur plutôt que la forme, la surface ou le dessin.

La définition de « produit » au sens de REACH est donc différente de celle définie selon les normes ISO. En effet, selon les normes ISO, un produit est défini comme « un bien ou un service destiné à être offert sur un marché pour être acquis, utilisé ou consommé, et qui peut satisfaire un besoin ou une exigence » (AFNOR, 2015). Cette définition met en lumière l'idée que le produit peut être matériel ou immatériel, tel qu'un bien physique ou un service, et qu'il répond à des attentes spécifiques des consommateurs ou utilisateurs.

2.3 L'obsolescence des produits dans les systèmes de défense et du spatial

Dans la fabrication et la maintenance des systèmes de défense et du spatial plusieurs domaines sont nécessaires, ces derniers sont représentés dans la Figure 5. Ils permettent de déterminer les liens directs ou indirects avec l'obsolescence des produits en fonction du domaine associé.

Il peut être ainsi identifier que l'obsolescence des produits concerne, d'une manière directe ou indirecte, tous les domaines concourants à la fabrication et à la maintenance des systèmes de défense et du spatial :

- De manière directe :

- Par l'utilisation de produit tel quel ;
- Dans la réalisation et la maintenance de pièces mécaniques, de machines et d'outils de fabrication, de contrôle et d'essais ;
- Dans la réalisation des parties matériels des pièces électroniques et des supports logiciels ;
- Dans la mise en place de procédures et procédés de fabrication utilisant des produits (exemple : soudage au plomb). Lorsqu'un problème d'obsolescence entraîne un procédé de fabrication obsolète à cause de l'utilisation d'un produit obsolète et aussi lorsque l'obsolescence d'un procédé de fabrication empêche la fabrication d'un produit avec un ensemble particulier de spécifications (Romero Rojo & al., 2010).

- De manière indirecte :

- Les connaissances et compétences du personnel dans le cas où la fabrication de produits nécessite des connaissances et compétences spécifiques.

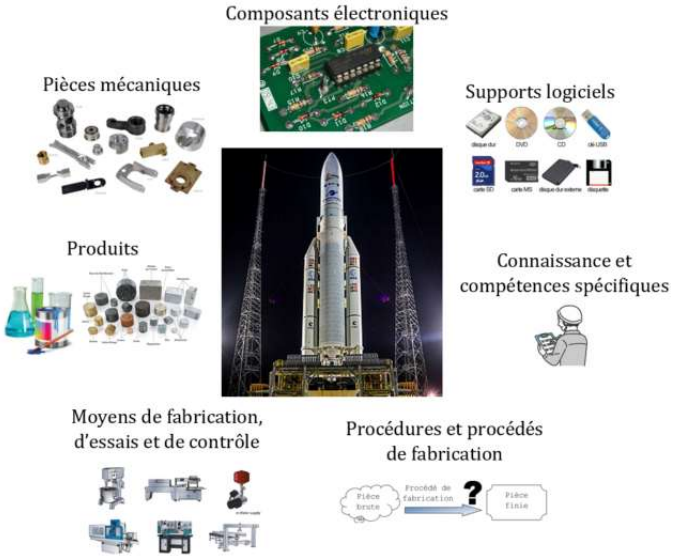


Figure 5. Les différents domaines touchés par l'obsolescence dans les systèmes de défense et du spatial.

2.4 Cadrage de l'étude

Pour définir le périmètre de cette étude, nous utilisons la méthodologie QQOQCCP.

- **Qui** est concerné par l'obsolescence des produits ?

Toute la chaîne de production des systèmes de défense et du spatial (des fournisseurs de matières premières à l'assembleur final) et l'utilisateur.

- **Quoi** ? Qu'est-ce qui est obsolète ?

Un produit concourant à la fabrication ou à la maintenance d'un système de défense ou d'un système spatial.

- **Où** cela impacte-t-il ?

Dans la chaîne de production d'un système (conception, fabrication, …), sur le système en lui-même (performances, fiabilité, …), sur la maintenance du système (adaptations, délais de réparation, coûts de maintenance, …) et les soutiens logistiques associées (gestion des stocks, documentation technique, …).

- **Quand** l'obsolescence devient-elle un problème ?

Lorsqu'un produit utilisé dans la chaîne de production ou dans la maintenance d'un système n'est plus fabriqué ou disponible.

- **Comment** éviter les problèmes liés à l'obsolescence des produits ?

En gérant l'obsolescence de manière proactive afin de détecter, anticiper et atténuer les risques liés à l'obsolescence.

- ❖ **Combien** d'industriels des secteurs de la défense et du spatial sont concernés ?

Tous les industriels.

- ❖ **Pourquoi** :
  - o Pourquoi l'obsolescence est un problème pour les secteurs de la défense et du spatial ?

- Existence de plusieurs sources d'obsolescence ;
- Les pratiques actuelles sont souvent réactives et ne suffisent pas à maitriser les risques liés à l'obsolescence des produits : fabrication de systèmes non conformes, impact sur les délais de production et de livraison, augmentation des coûts, arrêts de fabrication.

3 LES CAUSES DE L'OBSOLESCENCE DES PRODUITS

Les causes de l'obsolescence peuvent être scindées en deux :

- ➢ Les causes internes : ce sont celles qui résultent directement des décisions et des actions des entreprises, notamment des fabricants de produits ;
- ➢ Les causes externes : ce sont celles qui échappent au contrôle direct du fabricant et qui résultent de l'environnement économique, réglementaire ou logistique.

Les causes principales de l'obsolescence des produits évoquées dans la littérature sont ainsi présentées ci-après.

3.1 Les causes internes de l'obsolescence

3.1.1 Les décisions stratégiques des fabricants

L'obsolescence des produits peut être directement influencée par les décisions des fabricants, tels que :

- La réorientation vers des produits plus rentables : certaines entreprises cessent la production de produits peu rentables pour privilégier des technologies plus modernes et lucratives (Agrawal & Ülkü, 2012) ;
- La limitation de la disponibilité de certains produits pour encourager le renouvellement d'autres produits : cette stratégie, souvent associée à des pratiques de marchés planifiées, vise à inciter à l'achat de nouvelle versions ou gammes de produits (Sierra-Fontalvo & al., 2023) ;
- La fusion ou le rachat d'entreprises : ce type d'évolution peut amener la suppression volontaire de produits ou de lignes de production (Brebois, 2021).

3.1.2 Les problèmes organisationnels

La perte de compétences spécifiques nécessaire à la réalisation d'un produit peut provoquer l'obsolescence des produits (Brebois, 2021) qui s'explique donc par la perte de savoir-faire.

3.1.3 L'évolution de l'outil de production

Les phénomènes ci-dessous entre autres peuvent faire évoluer l'outil de production :

- L'introduction de nouveaux matériaux plus performants : l'émergence de nouvelles solutions plus légères, plus efficaces ou plus durables conduit progressivement à l'abandon des anciennes technologies(Sierra-Fontalvo & al., 2023) ;
- L'abandon des anciennes technologies ou procédés : certains procédés de fabrication et technologies deviennent obsolètes avec l'arrivée de solutions plus automatisées (Eggink & Reinders, 2013) ;
- Le changement dans les technologies de production : le passage à des processus de fabrication plus avancés peut rendre certains produits obsolètes et non compatibles avec les nouvelles lignes de production (George, 2024) ;
- Lorsqu'un problème d'obsolescence entraîne un procédé de fabrication obsolète à cause de l'utilisation d'un produit obsolète et aussi lorsque l'obsolescence d'un procédé de fabrication empêche la fabrication d'un produit avec un ensemble particulier de spécifications (Romero Rojo & al., 2010).

3.2 Les causes externes de l'obsolescence

3.2.1 Les facteurs économiques

Plusieurs facteurs économiques tels que ceux indiqués ci-dessous peuvent être à l'origine d'une obsolescence et peuvent même jusqu'à causer la faillite d'une entreprise :

- Les fluctuations des coûts des matières premières : une hausse soudaine des coûts peut rendre un matériau trop onéreux à produire, forçant son abandon (Pigosso & al., 2010) ;
- Le changement dans les besoins du marché : une demande en baisse pour un produit spécifique entraîne souvent l'arrêt de sa production (Product School, 2025) du fait de sa faible rentabilité ;
- La crise de l'énergie : lors d'une hausse brutale des prix de l'énergie, les technologies et infrastructures énergivores peuvent rapidement devenir obsolète car elles deviennent trop couteuses à maintenir ou à faire fonctionner. Par exemple en novembre 2022, l'entreprise française de verrerie Duralex a suspendu sa production pendant cinq mois en raison de l'augmentation des prix de l'énergie, mettant son four en veille et plaçant ses 240 salariés en chômage partiel. La production a repris en avril 2023, une fois les conditions énergétiques stabilisées (La rédaction JDE, 2022).

3.2.2 Les réglementations et normes

Le renforcement des réglementations et normes environnementales provoquent l'obsolescence de produits, par exemple :

- L'interdiction de substances jugées nuisibles pour l'environnement et le personnel au sein de l'Union Européenne (Parlement Européen et du Conseil, 2006) accélère l'obsolescence de produits ;
- La limitation de certains composants chimiques tel que le plomb dans les soudures électroniques (RoHS Directive, 2013) conduit à l'indisponibilité de certains produits ;
- L'interdiction de fabrication, de mise sur le marché et d'utilisation de Polluants Organiques Persistants (POP Regulation, 2019) conduit également à l'indisponibilité de certains produits ;
- Des exigences accrues en matière de qualité ou de sécurité peuvent rendre certains produits obsolètes s'ils ne respectent plus les nouvelles réglementations (Bressanelli & al., 2020) ; (Medical Device Coordination Group Document, 2023).

3.2.3 Les perturbations extérieures dans la chaîne d'approvisionnement

Les perturbations extérieures peuvent être de différents types tels que :

- Les contraintes et conflits géopolitiques : l'obsolescence d'un produit en raison d'un conflit géopolitique affecte directement les chaînes d'approvisionnement (Moradlou & al., 2025) ;
- Les difficultés dans l'approvisionnement des matières premières :
  - Les ruptures d'approvisionnement de certaines matières premières en raison de l'épuisement des ressources naturelles (Erdmann & Graedel, 2011) ;
  - L'indisponibilité de certaines ressources essentielles, comme les terres rares pour l'électronique, peut provoquer l'arrêt de production de produits spécifiques (Bakker & al., 2014).
- Les catastrophes naturelles affectant la production ou le transport : les tremblements de terre, inondations ou pandémies perturbent la production et la logistique des entreprises (Ivanov, 2020).

L'état de l'art des causes principales de l'obsolescence nous a permis d'établir le diagramme d'Ishikawa représenté dans la Figure 6. Ce diagramme permet de synthétiser les différentes causes relevées suivant la méthode 7M.

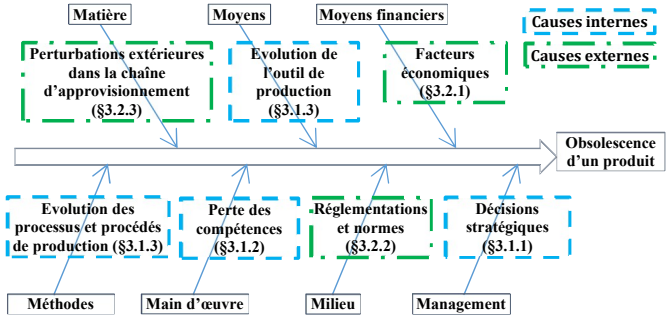


Figure 6. Les causes principales de l'obsolescence des produits suivant la méthode 7M du diagramme d'Ishikawa.

4 FOCUS SUR L'OBSOLESCENCE DES PRODUITS CAUSEE PAR LES REGLEMENTATIONS

L'obsolescence des produits dépend largement des réglementations (Souifi & Zolghadri, 2024) en raison de la toxicité de certaines substances, de leur impact environnemental, ou de leur potentiel à provoquer des risques pour la santé humaine.

Les facteurs d'obsolescences règlementaires les plus évoquées en Europe dans la littérature sont celles sur la réglementation REACH, la directive RoHS et le règlement POP ; les défis liés à ces facteurs d'obsolescences sont donc présentés ci-après.

4.1 La réglementation REACH

Si les risques sur l'environnement et/ou le personnel ne peuvent être gérés, les autorités peuvent restreindre voire interdire la fabrication et l'utilisation des substances concernées de diverses manières.

À terme, les substances les plus dangereuses devraient être remplacées par des substances moins dangereuses ; ce qui impacte donc les produits.

Les listes REACH peuvent être représentées suivant le principe d'entonnoir (voir Figure 7) présentant l'état des substances au 23/02/2025 issu du site internet de l'Agence Chimique Européenne (European Chemicals Agency, n.d).

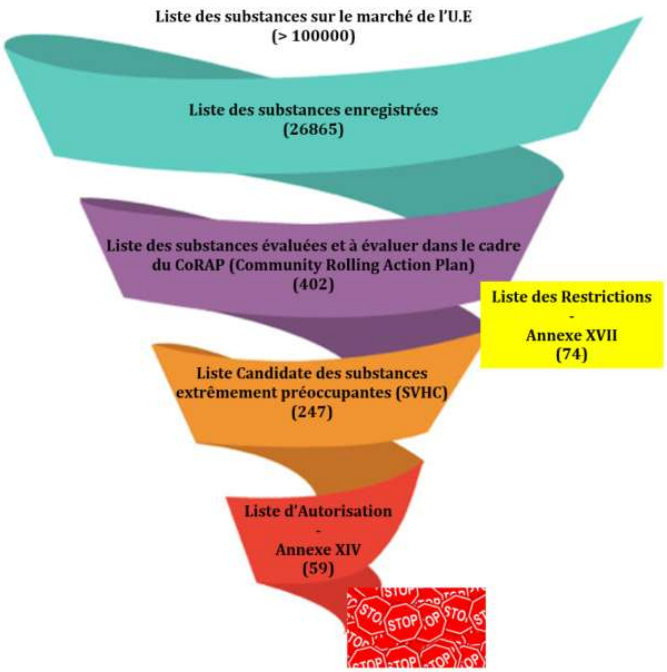


Figure 7. Principe d'entonnoir des listes REACH – état des substances au 23/02/2025.

4.2 Le règlement POP

Le règlement POP (Polluants Organiques Persistants) interdit la fabrication, la mise sur le marché et l'utilisation des substances qui figurent sur la liste de l'annexe I du règlement soit en tant que telles, soit dans des mélanges de substances, soit sous forme de constituant d'articles. Il vise également à identifier et réduire au minimum les rejets non intentionnels de POP. Enfin, il prévoit des mesures garantissant la gestion sûre, efficace et écologiquement rationnelle des stocks de POP et l'élimination des déchets qui sont constitués de POP, en contiennent ou sont contaminés par ces substances (POP Regulation, 2019).

Un exemple de POP est représenté dans la Figure 8 avec le cas des biphényles polychlorés (PCB). Ces substances ont été longtemps utilisés dans les appareils électriques pour prévenir la surchauffe, ou comme additifs dans le papier, les agents d'étanchéité et les matières plastiques. Désormais interdits, ils subsistent dans l'environnement et s'accumulent dans la chaine alimentaire. Les effets chroniques observés chez l'homme sont notamment des dommages du foie, des effets sur la reproduction et la croissance. Les PCB sont également classés en tant que substances très toxiques pour les organismes aquatiques.

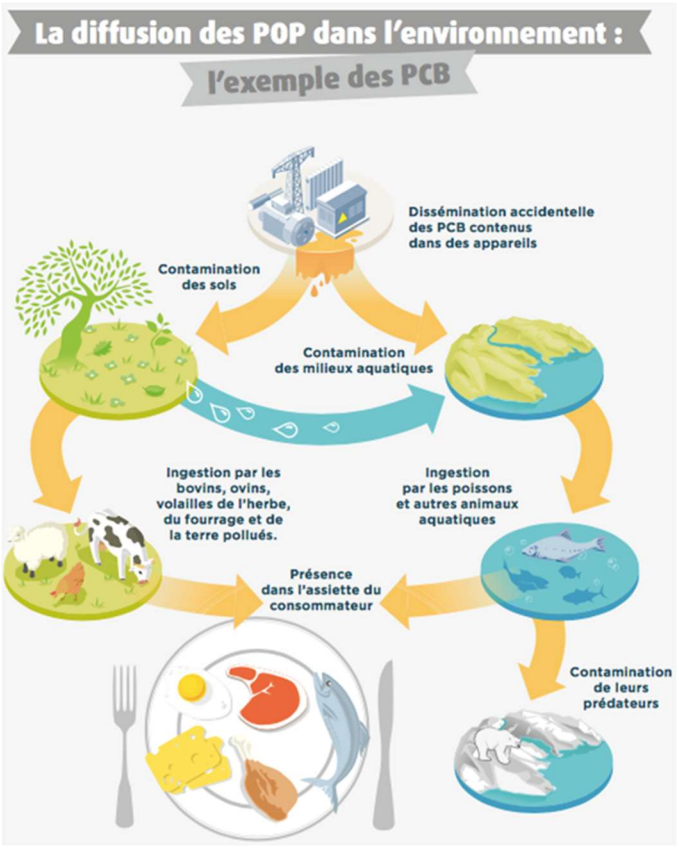


Figure 8. Exemple de diffusion d'un POP dans l'environnement (Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer, 2017)**.**

4.3 La directive RoHS

La directive RoHS limite l'utilisation de substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques (EEE) afin de protéger les hommes ainsi que l'environnement des substances chimiques dangereuses trouvées dans les EEE (RoHS Directive, 2013). Au 23/02/2025, 10 substances sont réglementées (voir Tableau 1).

Substance	**Limite de concentration (en poids dans les matériaux homogènes)**
Plomb (Pb)	0,1 % (1000 ppm)
Mercure (Hg)	0,1 % (1000 ppm)
Cadmium (Cd)	0,01 % (100 ppm)
Chrome hexavalent (Cr^{6+})	0,1 % (1000 ppm)
Polybromobiphényles (PBB)	0,1 % (1000 ppm)
Polybromodiphényléthers (PBDE)	0,1 % (1000 ppm)
Phtalate de bis(2-éthylhexyle) (DEHP)	0,1 % (1000 ppm)
Phtalate de butyle et de benzyle (BBP)	0,1 % (1000 ppm)
Phtalate de dibutyle (DBP)	0,1 % (1000 ppm)
Phtalate de diisobutyle (DIBP)	0,1 % (1000 ppm)

Tableau 1. Les substances réglementées RoHS et limites de concentration maximale autorisées (RoHS Directive, 2013)**.**

Ces obsolescences nécessitent la création de programmes de recherche visant à introduire de nouvelles technologies pouvant répondre aux besoins propres des systèmes de défense et du spatial d'une part, et dans la mise en place de moyens de gestion des nouveaux composants sans plomb par exemple dans la logistique de production et de maintenance, d'autre part (Lemagnen, 2011).

4.4 Les différences avec l'obsolescence des composants

A la différence de l'obsolescence des composants, qui peut souvent être contournée par des stratégies de stockage ou de sourcing alternatif, l'obsolescence des produits induite par les réglementions impacte directement la composition des articles. Elle impose des modifications susceptibles d'affecter en profondeur la conception des systèmes. Ce type d'obsolescence requiert généralement une anticipation plus importante car les solutions à mettre en œuvre s'inscrivent dans des délais plus longs et nécessitent des phases d'étude, de validation et d'adaptation plus étendues. Ces impacts peuvent notamment se traduire par :

- Le remplacement de produits ou substances devenus interdits (par exemple, substituer un plastique contenant un additif restreint par un matériau aux propriétés équivalentes).
- La reconception d'un article pour se conformer aux nouvelles exigences (géométrie, assemblage, performance, sécurité, …).
- La requalification ou la recertification du système, lorsque les modifications altèrent ses performances ou sa conformité.
- La refonte de procédés industriels, incluant la fabrication, l'assemblage, les tests ou la maintenance.

5 LES DEFIS LIES A L'OBSOLESCENCE

Du fait de ses causes, l'obsolescence des produits présente donc plusieurs défis :

➢ Défis techniques et fonctionnels :

- Réduction des performances : les remplaçants envisagés peuvent ne pas être équivalents aux produits obsolètes ;
- Manque de pièces de rechange : l'obsolescence peut rendre difficile voire impossible le maintien en condition opérationnelle des systèmes.

➢ Défis calendaires :

- Temps de développement et de mise en production : la non anticipation d'une obsolescence ou sa mauvaise gestion ainsi que les aléas techniques et organisationnels peuvent retarder le développement et l'implémentation de son remplaçant ;
- Augmentation des délais de production : le remplacement d'une obsolescence peut provoquer du retard de par l'implémentation de la nouvelle solution, un temps d'adaptation de montée en cadence de production, …

➢ Défis économiques :

- Coûts élevés de substitution : remplacer un produit obsolète par un autre peut entraîner des coûts importants (R&D, reconfiguration des chaînes de production, investissements pour adapter les systèmes, formation des employés, ...) ;
- Augmentation des prix : la raréfaction de certains produits ou des coûts élevés de substitution peuvent entraîner une hausse de leur coût.

➢ Défis liés à l'innovation :

Manque de maturité : un nouveau produit ou une nouvelle technologie peut ne pas être suffisamment développé ou fiable pour une mise sur le marché.

➢ Défis liés à la transmission d'informations :

- Risque d'un manque d'anticipation : un sous-traitant de rang N, fabriquant à partir de plusieurs substances un produit entrant dans la composition d'un article final, peut connaître l'obsolescence future d'une substance clé, mais si cette information ne circule pas correctement jusqu'au donneur d'ordre, celui-ci ne peut pas anticiper le plan d'actions nécessaires (qualifications, alternatives, adaptation des chaînes de production, …).
- Coûts et impacts opérationnels : une absence de communication peut entraîner des surcoûts importants (redesign, essais de qualification, certifications, …) et des retards de livraison voire des arrêts de fabrication.
- Facteurs bloquants :
  - Contrats non contraignants : si la déclaration des risques d'obsolescence n'est pas contractualisée, le sous-traitant peut ne pas juger nécessaire d'en informer son client.
  - Peur de perdre le marché : certains sous-traitants préfèrent régler le problème en interne plutôt que d'inquiéter leur donneur d'ordre, au risque que la situation devienne critique.
  - Chaîne de sous-traitance complexe : plus un sous-traitant est éloigné du client final, moins l'information a de chances d'être remontée efficacement.
- Veille réglementaire et documentaire : un des leviers majeurs pour anticiper les risques d'obsolescence réside dans la mise en place d'une veille de haut niveau, à la fois réglementaire et documentaire, afin d'anticiper les évolutions réglementaires et les annonces de retrait.

➢ Défis liés à la traçabilité des substances :

- Inventaire des substances : identifier précisément les substances contenues dans les produits et articles.
- Collaboration avec les fournisseurs : obtenir des fiches de données de sécurité (FDS) et assurer la traçabilité des substances.

6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'analyse de l'obsolescence des produits, à travers l'examen des définitions clés, des causes principales évoquées dans la littérature et des défis liés à l'obsolescence, met en évidence la complexité et l'importance de ce phénomène dans les secteurs de la défense et du spatial. L'étude souligne que l'obsolescence résulte de multiples facteurs, notamment des contraintes réglementaires qui exigent une adaptation continue des entreprises. Face aux défis pour la chaîne de production et pour l'utilisateur final, notamment en matière de coûts, de sécurité, de fiabilité, de pérennité et de compétitivité, il est crucial de mettre en place des stratégies de gestion de l'obsolescence proactives pour éviter les conséquences potentielles suivantes :

- La fabrication d'équipements ne répondant pas aux besoins (équipements non conformes) ;
- Des retards de livraisons (systèmes non livrés à l'heure) ;
- Des prix d'achat et de vente trop élevés (systèmes trop chers) ;
- Des ruptures d'approvisionnement de produits voire des arrêts de fabrication (systèmes non réalisables) ;
- Des freins pour l'innovation (développement des systèmes limité) ;
- La non-protection de la Base industrielle et Technologique de Défense (souveraineté et compétitivité nationale compromises).

Dans nos futurs travaux, un questionnaire d'enquête sera adressé à des industriels des secteurs de la défense et du spatial afin de cartographier les causes et les impacts de l'obsolescence dans ces secteurs, ainsi que les stratégies mises en place pour la gérer. L'analyse des résultats permettra d'identifier les causes et impacts les plus significatifs, et ainsi d'orienter les efforts vers une gestion plus efficace et anticipative de l'obsolescence.

Dans cette perspective, nous prévoyons d'étudier les circuits de remontée de l'information de la cause primaire de l'obsolescence, jusqu'au fournisseur du matériel final en passant par toute la chaine de sous-traitance.

La finalité de nos travaux est de développer un outil d'aide à la décision basé sur l'évaluation probabiliste des risques, permettant ainsi d'adopter des stratégies adaptées et durables face aux défis croissants de l'obsolescence des produits.

7 REFERENCES

Ivanov, D. (2020, april). Predicting the impacts of epidemic outbreaks on global supply chains: A simulation-based analysis on the coronavirus outbreak (COVID-19/SARS-CoV-2) case. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review, 136*.

AFNOR. (2015, septembre). ISO 9000:2015. *Systèmes de management de la qualité - Principes essentiels et vocabulaire*.

Agrawal, V., & Ülkü, S. (2012, octobre 5). The Role of Modular Upgradability as a Green Design Strategy. Manufacturing & Service Operations Management. pp. 15(4):640-648.

Bakker, C., & al. (2014, April 15). Products that go round: exploring product life extension through design. *Journal of Cleaner Production, 69*, 10-16.

Bakker, C., & al. (2014). *Products that last: Product design for circular business models.* Delf.

Brébois, J. (2021). *Stratégie et management de l'obsolescence dans le cadre d'équipements à long cycle de vie.* Louvain School of Management, Université catholique de Louvain.

Bressanelli, G., & al. (2020). Circular Economy in the WEEE industry: a systematic literature review and research agenda. *Sustainable Production and Consumption*, pp. 174-188.

Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2014). *The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies* (Vol. 31, Issue 5). New York.

Bulow, J. (1986). An Economic Theory of Planned Obsolescence. *The Quarterly Journal of Economics, 101*(4), 729-749.

Cooper , T. (2010). *Longer Lasting Products - Alternatives to the Throwaway Society.* Gower.

Eggink, W., & Reinders, A. (2013). The Design and Styling of Technology-based Innovations. *World Conference on Design Research (IASDR)*, *5.* Tokyo.

Erdmann, L., & Graedel, T. (2011, Août 11). Criticality of Non-Fuel Minerals: A Review of Major Approaches and Analyses. *Environmental Science & Technology, 45/Issue 18*.

European Chemicals Agency. (n.d). *ECHA Europa*. Consulté le 23/02/2025, sur Information on chemicals: https://echa.europa.eu/fr/information-on-chemicals

European Chemicals Agency. (n.d). *What is a substance? ECHA*. Consulté le 23/02/2025, sur https://echa.europa.eu/fr/support/substance-identification/what-is-a-substance

European Chemicals Agency. (n.d). *What is not a substance? ECHA*. Consulté le 23/02/2025, sur https://echa.europa.eu/fr/support/substance-identification/what-is-not-a-substance

George, A. (2024, January-February). The Fourth Industrial Revolution: A Primer on Industry 4.0 and its Transformative Impact. *Partners Universal Innovative Research Publication (PUIRP), 2*(01).

International Electrotechnical Commission (IEC). (2019). IEC 62402:2019. *Gestion de l'obsolescence*.

Jennings, C., & al. (2016, September). Forecasting Obsolescence Risk and Product Life Cycle With Machine Learning. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 6*(9).

La rédaction JDE. (2022, novembre 1). Duralex suspend temporairement son four à cause des prix de l'énergie. *Le Journal De l'Economie*.

Lemagnen, M. (2011). Intégration du risque chimique dans la conception de produits industriels. Application au secteur aéronautique. Université de Grenoble.

Linton, J., & Walsh, S. (2008). Acceleration and Extension of Opportunity Recognition for Nanotechnologies and Other Emerging Technologies. *International Small Business Journal, 26 (1)*, 83-99.

Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer. (2017, Avril). *Les polluants organiques persistants*. Récupéré sur https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/publications/15207-1_Polluants-organiques-persistants-POP_DEF_Web.pdf

Nelson III, R., & Sandborn, P. (2012). Strategic management of component obsolescence using constraint-driven design refresh planning. *International Journal of Product Lifecycle Management (IJPLM), 6*(2).

Parlement Européen et du Conseil. (2006). Règlement REACH (CE) N° 1907/2006. *Journal officiel de l'Union européenne*.

Pigosso, D., & al. (2010). Is the Industrial Product-Service System really sustainable? *CIRP IPS2 Conference*, (pp. 59-65).

POP Regulation. (2019). Persistant Organic Pollutants (EU) No 2019/1021. *European Parliament and of the Council*.

RoHS Directive. (2013). Restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment. *Off. J. Eur. Communities*.

Romero Rojo, F. J., & al. (2010). Obsolescence management for long-life contracts: State of the art and future trends. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 49(9-12)*, 1235-1250. Récupéré sur https://doi.org/10.1007/s00170-009-2471-3

Sandborn, P. (2007). Designing for Technology Obsolescence Management. *Proceedings of the 2007 Industrial Engineering Research Conference.* Maryland.

School, P. (2025). What Is an End-of-Life Product? Key Facts to Consider.

Sierra-Fontalvo, L., & al. (2023). A deep dive into addressing obsolescence in product design: A review. *Heliyon 9*.

Singh, P., & al. (2004). Electronic Part Obsolescence Driven Product Redesign Planning. *International Journal Of Advances Manufacturing Systems, 7 Issue 2*.

Slade, G. (2007). Made to Break: Technology and Obsolescence in America. *Harvard University Press*.

Souifi, A., & Zolghadri, M. (2024). Obsolescence Risk assesment: Key Challenges and Pratical Lessons. *IFAC Papers Online*, pp. 486-491.

Van Nes, N., & Cramer, J. (2006). Product lifetime optimization: a challenging strategy towards more sustainable consumption patterns. *Journal of Cleaner Production, 14 _ Issue 15-16*, 1307-1318.

CIGI QUALITA MOSIM 2025

An explainable deep learning model for predictive maintenance

PARDIS POURKARIM GUILANI, MUSTAPHA NOURELFATH

UNIVERSITÉ LAVAL
Mechanical and Industrial Engineering Department
CIRRELT
PARDIS.POURKARIM-GUILANI.1@ULAVAL.CA
MUSTAPHA.NOURELFATH@GMC.ULAVAL.CA

Résumé

Cet article développe un réseau de mémoire longue à court terme (LSTM) explicable pour déterminer l'état de santé d'un système multi-états en prédisant la durée de vie utile restante. En fonction de la valeur prédite de la durée de vie utile restante, trois classes ou catégories d'états sont considérées : Normal, Dégradé et Critique. Pour identifier les caractéristiques les plus influentes sur les décisions de prédiction, la méthode d'explications additives de Shapley (SHAP) est appliquée pour parvenir à des décisions de maintenance prédictive explicables. Le modèle LSTM explicable qui en résulte est validé à l'aide d'un ensemble de données d'analyse comparative fourni par la NASA pour une simulation de système d'aéropropulsion modulaire d'un turboréacteur commercial. Il s'avère que la précision du LSTM surpasse certaines méthodes traditionnelles. De plus, l'exemple considéré illustre qu'en déterminant les capteurs les plus influents, la méthode permet de prendre des décisions de maintenance explicables permettant d'allouer les ressources plus efficacement.

Abstract

This paper develops an explainable Long Short-Term Memory (LSTM) network to determine the health state of a multi-state system by predicting the Remaining Useful Life (RUL). Depending on the value of the predicted RUL, three classes or categories of states are considered: Normal, Warning, and Critical. To identify the most influential features on prediction decisions, the Shapley Additive Explanation (SHAP) is applied as a model-agnostic method to reach explainable predictive maintenance decisions. The resulting explainable LSTM model is validated using a benchmarking data set provided by NASA for a Modular Aero-Propulsion System Simulation of a Commercial Turbofan Engine. It is found that the LSTM accuracy outperforms some traditional methods. Furthermore, the Turbofan Engine example highlights that by determining the most influential sensors through deep SHAP, the method allows for explainable maintenance decisions to allocate resources more efficiently.

Mots clés **– Pronostic, Maintenance prédictive, Intelligence artificielle, Apprentissage profond, Explicabilité.**

Keywords **– Prognostics, Predictive maintenance, Artificial intelligence, Deep learning, Explainability.**

1 INTRODUCTION

With "Industry 4.0", health management of industrial equipment has become essential. Prognostic and Health Management plays a key role in smart manufacturing by using large-scale data to monitor equipment performance. Predictive maintenance (PdM) helps detect early signs of failures, reducing risks, costs and ensuring safer, more efficient operations.(Zhang et al., 2019). PdM includes key steps: fault detection to identify emerging defects, diagnostic to spot fault types, and fault prognostic to predict RUL(Azari et al., 2023).

PdM approaches are either model-based or data-driven. Model-based methods use experiments, observations, and monitoring data to assess damage, but depend heavily on prior knowledge and may miss complex degradation patterns, leading to suboptimal maintenance decisions. On the contrary, data-driven methods use real sensory data to detect and monitor degradation behavior of systems. These approaches are highly effective in manufacturing environments where the impact of external events is negligible. By updating sensory data over time, data-driven approaches can adapt and improve their predictions.

Fault detection and the accuracy of PdM have significantly improved through data-driven approaches, especially deep learning (DL) as a powerful technique of artificial neural networks (Dehghan Shoorkand et al., 2023). However, DL models lack interpretability and often function as black boxes, that makes it challenging for humans to understand the reasoning behind their predictions. To deal with this research gap, explainable artificial intelligence (XAI) tools can be used to clarify and interpret artificial intelligence (AI) model decisions, illustrating their strengths and weaknesses and making the results more understandable and reliable for users(Ferraro et al., 2023). This paper focuses on integrating XAI techniques with DL approaches to develop a reliable and interpretable PdM strategy. To contribute to overcoming the existing challenge related to the lack of explainability of the AI methods applied to PdM in real-life industrial settings, this paper is organized as follows. Section 2 provides an overview

of related work to highlight the paper contribution. Section 3 outlines the proposed methodology, while Section 4 presents and analyzes the experimental results. Finally, Section 5 concludes the paper.

2 RELATED WORK

This section consists in a brief and non-exhaustive review on three main literature bodies that are related to our work. We will first review some important papers dealing with PdM. Then, we will summarize some existing papers using artificial intelligence models. Finally, the relatively scarce literature on explainable artificial intelligence techniques will be reviewed, before presenting the research gap motivating this paper.

2.1 Predictive maintenance

PdM is a proactive strategy that monitors equipment conditions to predict the RUL of components. Condition monitoring identifies initial signals of potential malfunctions, emphasizes identifying changes but not necessarily forecasting failures. Advanced diagnostic and prognostic methodologies are vital for accurate predictions, converting data into practical knowledge for more efficient maintenance decisions(Manchadi et al., 2023). Prognostic and diagnostic methods in PdM can be divided into two key strategies, single-model and multi-model approaches. Single-model approaches rely on one type of model for estimation including knowledge-based, physics-based and data-driven models. In contrast, multi-model methods integrate at least two of these model types to create a more comprehensive and robust framework. Knowledge-based models depend on expert-defined rules and domain knowledge for predictions. Physics-based models simulate real-world behavior employing scientific rules and mathematical equations. On the other hand, data-driven models learn from historical data to identify patterns and make forecasts (Jimenez et al., 2020). Pieri et al. (Pieri et al., 2001) developed a knowledge-based decision support system to help with maintaining equipment in a chemical plant. This system used information about the equipment, potential corrosive substances, and other critical factors to offer the best maintenance plans. (Bekkaoui et al., 2015) designed a knowledge-based system to identify the most suitable experts for addressing the maintenance challenges in industries. This is done by utilizing domain ontology and experience feedback models to link expert knowledge and past performance, ultimately enhancing maintenance productivity and efficiency. (Işık, 2023) developed a knowledge-based maintenance system for compressed air systems within the context of industry 4.0, which applied PdM strategies to improve efficiency and reduce energy consumption. (Cholette et al., 2019) proposed hybrid degradation model combined physics-based principles, and a Gamma Process that estimated maintenance expenses and assisted in planning the replacement of boiler heat exchangers affected by erosion. Similarly, (Hassani.N et al., 2019) presented an enhanced physics-based model integrating Gaussian Process Regression to improve RUL predictions for rolling bearing. (Park et al., 2018) developed a fault detection model for edge computing featuring an edge device that combines data collection, processing, storage, and analysis. A Long Short-Term Memory (LSTM) network was employed to identify six distinct fault types in industrial robots. The objective of this method was to reduce the dependence on expert knowledge and expertise for processing data features. (Liu et al., 2019) introduced an approach for RUL prediction of proton exchange membrane fuel cells using an LSTM recurrent neural network (RNN). Their method employs regular interval sampling combined with locally weighted scatterplot smoothing to regenerate the data. The modified data is then fed into the LSTM network for RUL prediction. Another example of a data-driven approach is the research by (Qu et al., 2019), which used LSTM networks, Particle Swarm Optimization, and an Attention Mechanism to predict the RUL of lithium-ion batteries. By applying Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise for noise reduction, this method demonstrated higher accuracy than traditional approaches using NASA's battery dataset. (Kang et al., 2021) explored a data-driven technique for predicting the RUL of production line equipment. A multilayer perceptron (MLP) neural network was applied on NASA's turbo engine dataset, exhibiting reliable RUL predictions and improved outcomes for PdM.

2.2 Artificial intelligence models

AI is a vast field focused on creating systems that behave intelligently by learning and discovering knowledge from data. There is a significant overlap with traditional statistical methods. Machine learning (ML), a branch of AI, uses algorithms to uncover predictive patterns in data and analyze it through data-driven statistical models. Contrary to the traditional statistical approach, ML offers a more comprehensive range of statistical techniques. Advanced methods, such as DL depend on fewer assumptions about the data, allowing them to efficiently handle complex datasets (Panch et al., 2018). ML approaches excel at handling high-dimensional, multivariate data and revealing hidden patterns in complex scenarios. However, their success largely depends on choosing the most appropriate methods for the specific problem at hand (Manchadi et al., 2023). (Y. Zheng et al., 2014) presented a ML System for classification tasks using Convolutional Neural Networks (CNN). Their approach simplifies complex, multivariable time-series data by dividing it into separate individual time series for each variable. Features are extracted simultaneously from these variables utilizing CNN, and classification is implemented with an MLP. (Lee et al., 2016) and (Wang et al., 2016) both investigated the application of CNN for fault diagnosis. Lee et al. focused on detecting bearing faults with high accuracy, using CNNs on a dataset comprising single-variable and two-variable time series signals. On the other hand, Wang et al. introduced a CNN-based method enhanced by wavelet analysis to improve fault diagnosis performance. (Sateesh Babu et al., 2016) developed a deep CNN regression model for predicting RUL. The data is initially pre-processed using a time window method to improve CNN's ability to extract meaningful features. The RUL is then predicted based on the learned features. In another study, (Shaheen et al., 2023) introduced a new approach for predicting failures and RUL of mechanical components using Accumulative Artificial Neural Networks (ANN). The method ensures accurate and consistent predictions by integrating an improved Neuron-by-Neuron (NBN) training algorithm with a unique accumulative network design.

2.3 Explainable artificial intelligence techniques

AI has made significant progress in automating pattern recognition and supporting experts in complex decision-making tasks. By using data-driven strategies, AI can greatly improve productivity and integrate analytical insights into workflows. However, successful implementation requires clear, explainable results and trust in the system's reasoning and outcomes (Ahmed et al., 2022). (Serradilla et al., 2020) presented an ML model designed to estimate the RUL of mechanical components using fatigue test data. By applying the Random Forest

algorithm for its accuracy and explainability, the research combines domain expertise with XAI tools such as Explain Like I'm 5 (ELI5) and (Local Interpretable Model-agnostic Explanations (LIME) to identify key predictors. The findings showcase the potential of data-driven approaches in industrial processes and underline the importance of collaboration between experts and AI for more efficient PdM. (Senoner et al., 2021) presented a data-driven decision model to improve process quality in manufacturing by addressing the complexity of high-dimensional, nonlinear data. The model used Shapley Additive Explanations (SHAP) to identify critical production parameters and prioritize actions aimed at improving quality. In a real-world application, the model achieved a 21.7% reduction in yield loss, highlighting the practical benefits of XAI in advancing quality management strategies. In another study, (Youness & Aalah, 2023) employed a feature clustering method during preprocessing, which reduced model complexity while maintaining essential information. Their approach enhanced interpretability and identified critical factors leading to degradation, by using a single-layer LSTM and integrating SHAP values for explainability. Experimental results demonstrated superior performance, outperforming state-of-the-art methods with a simpler, more straightforward and interpretable design. (Ferraro et al., 2023) investigated the use of SHAP and LIME, to enhance the interpretability of RUL predictions for hard disk drives (HDDs) using the Backblaze dataset. They utilized an LSTM-based model to capture spatial and temporal patterns in HDD health data, comparing SHAP and LIME across metrics such as stability, invariance, and separability. The results indicated that SHAP provided more comprehensive insights at both global and local levels, while LIME displayed greater reliability and stability in its performance.

2.4 Research gap and paper contribution

The above literature review highlights the AI potential and opportunities to reach highly accurate and explainable fault detection, diagnosis and prognosis (FDDP) in predictive maintenance systems. In fact, even if the results obtained from data-driven AI methods can be very accurate in tasks like RUL prediction, humans often perceive the models as black boxes, which limits their adoption in industrial decision-making. The decision-making behind the black boxes must be more transparent, and understandable for humans. The existing literature has highlighted the crucial importance of developing explainable, interpretable, and trustworthy AI for FDDP. Understanding the FDDP decision making is very important to prescribe efficient maintenance actions. To address this gap, the present study focuses on formulating RUL classification prediction using an LSTM model and applying the Shapley additive explanation method (Lundberg & Lee, 2017) as a model-agnostic method to reach explainable maintenance decisions based on interpretable FDDP to identify the most influential features on RUL prediction decisions. While DL and interpretability techniques have been individually investigated in previous RUL prediction research, the novelty of the current study is integrating a three-class LSTM-based RUL classification model with SHAP explanations to provide both accurate and interpretable multi-class RUL predictions within a unified framework.

3 METHODOLOGY

The proposed methodology first develops an LSTM network for RUL prediction. Then, a deep Shapley Additive Explanations (SHAP) Technique is proposed to interpret the prediction results for PdM purpose.

3.1 LSTM

Long Short-Term Memory (LSTM) (Hochreiter, 1997) is a specialized architecture of RNNs that is designed to address challenges such as vanishing gradients and manage long-term dependencies effectively in sequence prediction tasks (Hochreiter & Schmidhuber, 1996). LSTM models enhance the memory capabilities of RNNs, allowing them to learn and maintain long-term dependencies in input data. This extended memory can store information for longer durations, enabling the processes of reading, writing, and forgetting information as needed. LSTM has a memory structure called “gated” cell, designed to determine which information to keep or discard. LSTM works by extracting key features from inputs, allowing it to access important information as time passes. These decisions rely on weight values that the model learns during the training process. These weights help the model to decide to keep or remove information (Siami-Namini et al., 2019).

All these properties make LSTM a well-suited model for RUL prediction based on time-series sensor data, where sequential measurements capture gradual degradation patterns over time(S. Zheng et al., 2017).

An LSTM model includes three primary gates: input, output, and forget gates. Each gate performs a specific purpose in managing the flow of information. In addition to these gates, LSTM consists of a cell state c_t, which act as a memory and stores key information over long sequences. The information flow manages the input and output of the cell state, effectively controlling it. The input gate regulates how much new information is added to the memory, the output gate decides if the stored information will contribute to the model's output, and the forget gate determines whether to retain or discard existing information (Hesabi et al., 2022; Siami-Namini et al., 2019).

The forget gate typically employs a sigmoid activation function σ to decide which information should be removed from the LSTM memory. This decision is based on the previous hidden state h_{t-1} and the current input x_t. The output of the forget gate, denoted as f_t ranges between 0 and 1, where 0 means completely discarding the information and 1 means fully retaining it. The forget gate f_t is calculated as follows (Siami-Namini et al., 2019):

$$f_t = \sigma\big(W_{f_h}[h_{t-1}], W_{f_x}[x_t], b_f\big) \tag{1}$$

where W_{f_h} and W_{f_x} indicate the weights applied to the previous hidden state and current input, respectively, and b_f is the bias value for forget state.

The input gate comprises two different layers.

A sigmoid layer, which determines the values that need updating, as shown in this equation:

$$i_t = \sigma\big(W_{i_h}[h_{t-1}], W_{i_x}[x_t], b_i\big) \tag{2}$$

where W_{i_h} and W_{i_x} represent the weights applied to the previous hidden state and current input, respectively, and b_i is the bias value for input gate.

A tanh layer, which produces a vector of new candidate values to be incorporated into the LSTM memory as follows:

$$\tilde{c_t} = \tanh\big(W_{c_h}[h_{t-1}], W_{c_x}[x_t], b_c\big) \tag{3}$$

where W_{c_h} and W_{c_x} represent the weights applied to the previous hidden state and current input, respectively, and b_c is the bias value for cell state.

These two layers work together to update the LSTM memory by first using the forget gate to ignore part of the current value, c_{t-1}, through multiplication. Then, a new candidate value ($i_t . c_t^{\sim}$) is added to complete the update. The process is captured in the following equation:

$$c_t = f_t . c_{t-1} + i_t . c_t^{\sim} \quad (4)$$

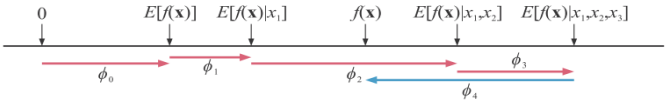
Finally, the output gate functions based on 3 steps. The first step is a sigmoid layer that identifies which parts of the LSTM memory should affect the output. The second step is a tanh function that is applied to scale the values to a range between -1 and 1. As a final step, this scaled output is multiplied by the result of the sigmoid layer. The formulas for these computations are provided as follows:

$$o_t = \sigma\left(W_{o_h}[h_{t-1}], W_{o_x}[x_t], b_o\right) \quad (5)$$

$$h_t = o_t . \tanh\left(c_t\right) \quad (6)$$

Here, o_t represents the output value, while h_t is its corresponding value scaled between -1 and 1.

Figure 1. SHAP Value Attributes (Mangalathu et al., 2020)



3.2 Shapley Additive Explanations (SHAP) Technique

Shapley Additive Explanations (SHAP), an approach derived from Game Theory, helps humans to understand how an ML model works. SHAP makes the model more comprehensive by showing how each input affects output. Indeed, the model's prediction is seen as a sum of the effects of its different inputs. For example, if a model takes inputs $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \ldots, x_p)$, where p is the total number of input variables, SHAP creates a simplified model, $g(\boldsymbol{x}')$, which explain the output of the original model, $f(x)$, as a composition of these inputs and is shown by:

$$f(\boldsymbol{x}) = g(\boldsymbol{x}') = \phi_0 + \sum_{i=1}^{M} \phi_i \boldsymbol{x}'_i \quad (7)$$

where $\boldsymbol{M}$ represents the number of input features, and $\boldsymbol{\phi_0}$ indicates the constant value when all inputs are missing ($\phi_0 = f(h_x(0))$), through a mapping function, $\boldsymbol{x}$=$h_x(\boldsymbol{x}')$, the inputs $\boldsymbol{x}'$ and $\boldsymbol{x}$ are connected. Figure 1 provides a visual representation of Equation (7), where ϕ_0, ϕ_1, ϕ_2, and ϕ_3 contribute positively to the prediction of g(), while ϕ_4 contributes negatively.

A remarkable feature of additive feature attribution methods is that they have a single unique solution that satisfies three key properties: local accuracy, missingness, and consistency. Local accuracy ensures that the function's output equals the sum of the feature attributions. It also requires that the model's output corresponds f for the simplified input $\boldsymbol{x}'$, and occurs when $\boldsymbol{x}$=$h_x(\boldsymbol{x}')$. Missingness guarantees that when $\boldsymbol{x}'_i = 0$,then $\phi_i = 0$. In other words, features that are missing are ignored. Finally, consistency confirms that increasing the impact of a feature will not reduce the attribution given to it. The setup z'\i defines a condition where, for $\boldsymbol{z}'_i = 0$, the inequality $f'_x(\boldsymbol{z}') - f'_x(\boldsymbol{z}'\backslash i) \geq f_x(\boldsymbol{z}') - f_x(\boldsymbol{z}'\backslash i)$ implies $\phi_i(f', \boldsymbol{x}) \geq \phi_i(f, \boldsymbol{x})$. The only model satisfying these criteria is given by:

$$\phi_i(f, \boldsymbol{x}) = \sum_{\boldsymbol{z}' \subseteq \mathrm{x}'} \frac{|\mathbf{z}'|!\,(M - |\mathbf{z}'| - 1)!}{M!} \left[f_x(\mathbf{z}') - f_x\left(\mathbf{z}'\backslash i\right)\right] \quad (8)$$

Where $|\boldsymbol{z}'|$ denotes the numbers of non-zero entries in $\boldsymbol{z}'$, $\boldsymbol{z}' \subseteq$ x′ and ϕ_i indicates the Shapely values.

A solution to Equation (8) is defined as $f_x(\boldsymbol{z}') = f(h_x(\boldsymbol{z}')) = E[\mathrm{f(z)}|\boldsymbol{z}_S]$, where S stands for the set of non-zero indices in $\boldsymbol{z}'$, called SHAP values. These values provide a powerful way to explain how individual data points, as well as overall patterns in a dataset, influence the model's predictions. There are several techniques, such as Kernel SHAP, Deep SHAP, and Tree SHAP, that can be used to estimate SHAP values (Lundberg & Lee, 2017; Mangalathu et al., 2020). In this paper, we utilize Deep SHAP explainer.

3.3 Deep SHAP for Explaining Model Predictions

Deep SHAP is an advanced version of SHAP specifically designed for deep learning models. It builds on the DeepLIFT method by adapting its backpropagation rules to efficiently estimate SHAP values. DeepLIFT utilizes a linear composition rule, which can be interpreted as linearizing the non-linear components of a neural network. Deep SHAP extends this approach by breaking the model into smaller parts, computing SHAP values for each and then combining them for the entire model. This method ensures critical SHAP properties such as local accuracy, missingness, and consistency while improving computational performance(Lundberg & Lee, 2017), which makes it particularly suitable for interpreting complex models such as LSTM in PdM applications, where understanding the influence of each feature is critical for making reliable decisions. It also aligns more closely with human reasoning in model interpretation tasks, offering a unified and theoretically grounded framework for explaining complex models.

In this study, we employ Deep SHAP to interpret a deep learning model trained on sequential time-series data. To ensure that the background distribution is meaningful, we select representative samples from both the training and validation datasets while preserving their temporal structure. In addition, we modify the model by adding a Softmax activation layer to guarantee that the output probabilities are properly organized for SHAP analysis.

Using shap.DeepExplainer, we compute the SHAP values for the test set, allowing us to visualize and better understand the impact of different features on the model predictions. This analysis not only highlights which features play the most significant role in classification decisions but also helps understand the model's internal decision-making process.

4 EXPERIMENTAL RESULTS

4.1 Dataset and Preprocessing

4.1.1 Dataset

In the current study, we used the NASA Commercial Modular Aero-Propulsion System Simulation (C-MAPSS) dataset, focusing on the FD001 subset(Saxena et al., 2008), which is widely utilized for prognostics and RUL prediction problems. The FD001 dataset contains operational data from 100 engines, each operating under a consistent operating condition and failure mode. It includes 21 sensor readings and 3 operational settings, recorded over multiple time cycles until a failure event

occurs. This dataset provides labeled RUL values, making it suitable for supervised learning tasks.

4.1.2 Preprocessing

Feature Selection

To enhance model efficiency and remove non-informative features, we employed low-variance filtering to the dataset (Nayak & Jaidhar, 2023). Features with a standard deviation below 0.01 were considered as having minimal variation and were removed from the dataset. This step helps to reduce redundant features that do not contribute significantly to predictive performance. The eliminated sensor and operational settings features that exhibited near-constant value across the dataset ensure that only meaningful variations in the data are preserved for further processing.

Normalization

The sensor readings and operational settings were normalized using Min-Max Scaling(Shantal et al., 2023) to ensure that all features have values within the range [0,1]. This scaling helps the model converge faster during training and prevents features with large ranges from dominating the learning process.

Label Conversion

The RUL values were converted into three classes using thresholds L_1 and L_2 as defined in Table 1. This approach simplifies the regression problem into a classification task, which aligns with the objective of identifying critical states.

Table 1. RUL Categories

Interval	Class	Description
$RUL \leq L_1$	2	Critical
$L_1 < RUL \leq L_2$	1	Warning
$RUL > L_2$	0	Normal

Sequence Length

A sliding window approach with a sequence length of 30 cycles was used to create input sequences for the model. This sequence length was chosen based on experimentation to capture sufficient historical information for accurate predictions while avoiding excessive computational overhead.

Training and Validation Split

The training data was split into training (80%) and validation (20%) subsets. This split ensures the model's performance is evaluated on unseen validation data during training, helping to monitor overfitting. The validation subset consists of 20% of the units, which were entirely excluded from the training process. Since the data follows a time series structure, the order was maintained to preserve temporal dependencies.

Hyperparameters

Our model is an LSTM network, chosen for its ability to capture temporal dependencies in sequential data. The architecture includes three LSTM layers, followed by fully connected layers to produce three class output predictions for RUL classification. The detailed model parameters are presented in Table 2. While some hyperparameters—such as the number of LSTM hidden units, number of layers, dropout rate, learning rate, and batch size—were optimized using a Grid Search based on validation performance, others like the input/output dimensions, optimizer, and loss function were predefined based on problem characteristics and prior research.

Table 2. Model Hyperparameters

Parameter & Description	Value
Input Dimension: Number of input features (21 sensors + 3 operational settings).	24
LSTM Hidden Units: Number of units in each LSTM layer.	150
Number of LSTM layers.	3
Dropout Rate: Regularization parameter to prevent overfitting.	0.3
Output Dimension: 3 classes	3
Batch Size: Number of samples processed in each training batch.	128
Sequence Length: The number of time steps used for each sequence input.	30
Optimizer: Adaptive optimizer with weight decay.	AdamW (Loshchilov, 2017)
Learning Rate: Initial learning rate for the optimizer.	0.0001
Loss Function: Suitable for multi-class classification tasks.	Categorical Cross-Entropy (Mao et al., 2023)

Model Evaluation

The performance of the model was assessed using the below standard evaluation metrics (Sokolova & Lapalme, 2009): Precision, Recall, F1-score, and Accuracy were calculated to measure classification performance.

Precision measures the proportion of correctly predicted instances for each class out of all instances predicted as that class.

$$\text{Precision}_i = \frac{TP_i}{TP_i + FP_i} \times 100 \quad (9)$$

TP_i (True Positives): The number of correctly predicted instances of class *i*.
FP_i (False Positives): The number of instances incorrectly predicted as class *i*.

Recall measures the proportion of correctly predicted instances for each class out of all actual instances of that class.

$$\text{Recall}_i = \frac{TP_i}{TP_i + FN_i} \times 100 \quad (10)$$

FN_i (False Negatives): The number of instances of class *i* incorrectly predicted as another class .

F1-score is the harmonic means of precision and recall, balancing their contributions.

$$\text{F1} - \text{score}_i = 2.\frac{\text{Precision}_i.\text{Recall}_i}{\text{Precision}_i + \text{Recall}_i} \times 100 \quad (11)$$

To summarize performance across all classes, we calculate:

Macro-average: The unweighted mean of precision, recall, and F1-score across all classes.
Micro-average: A global metric considering the total number of TP, FP, and FN across all classes.

Accuracy: Accuracy measures the proportion of correctly predicted instances across all classes.

$$\text{Accuracy} = \frac{Total\ correct\ predictions}{Total\ Number\ of\ Predictions} \times 100 \qquad (12)$$

Confusion Matrix was used to visualize the distribution of predictions across actual and predicted classes. Each cell in the matrix represents the percentage of samples from the actual class that were predicted as a specific predicted class.

4.2 Numerical analysis

This section presents the performance evaluation of our model on the test dataset using multiple evaluation metrics, including accuracy, precision, recall, and F1-score. The impact of features on model predictions was analyzed using SHAP values, and model generalization was assessed via confusion matrix.

Our model was evaluated based on the last available sequence of each unit, representing the most recent operational state before failure (Pan et al., 2019). This method aligns with real-world PdM applications, where failure predictions are typically made using the latest available sensor readings.

4.2.1 Evaluation Metrics Results

The results of evaluation metrics are summarized in Table 3. The model demonstrated high performance in classifying the Normal and Critical categories. Specifically, the Normal class achieved a precision of 94.44% and a recall of 92.73%, while the Critical class obtained a precision of 92.31% and a recall of 96.00%. These results indicate that the model effectively identifies these two categories. The overall accuracy of the model is 90.00%, demonstrating strong predictive capability in estimating the RUL classification.

Table 4 is a comparison of the total accuracy for current LSTM algorithm and the algorithms in (Soni et al., 2021) research. Our proposed LSTM-based model outperforms traditional machine learning methods in RUL classification, achieving an overall accuracy of 90%, compared to 81% for Random Forest and 80% for Logistic Regression.

Table 3. Results of Evaluation Metrics (%)

Class	Precision	Recall	F1-Score
Normal	94.44	92.73	93.58
Warning	75.00	75.00	75.00
Critical	92.31	96.00	94.12
Macro	87.25	87.91	87.57
Micro	90.00	90.00	90.00
Total Accuracy		90.00	

Table 4. Overall Accuracy of Different Algorithms

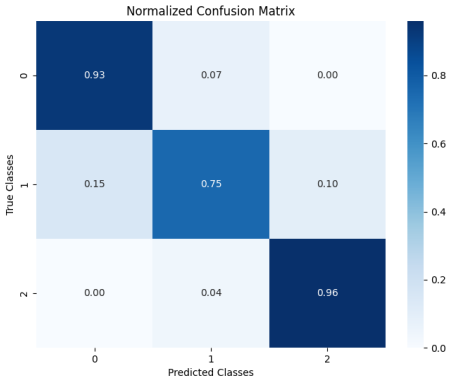
Algorithm	Overall Accuracy
LSTM	90%
Logistic Regression	80%
Decision Tree	77%
AdaBoost	76%
Gradient Boosting	79.6
Random Forest	81%

Figure 2 highlights the confusion matrix results and the strong classification performance of the proposed model. The model exhibits excellent correct classification rate in distinguishing Class 0 and 2, achieving 93% and 96% correct predictions, respectively. While the class 1 demonstrates slightly lower performance at 75%, the model still effectively identifies between operational conditions. These results validate the model's capability in PdM, with potential for further enhancement in refining transitional state predictions.

4.2.2 SHAP Analysis for Feature Importance

SHAP was applied to interpret the impact of different sensors on the LSTM model's predictions. Figures 3, 4, and 5 illustrate the SHAP summary plots for the three RUL classes: Normal (Class 0), Warning (Class 1), and Critical (Class 2), respectively. The results show that the model effectively identifies health states based on key sensor inputs. The x-axis represents SHAP values, which shows the impact of a feature on pushing the model output towards or away from each class. The y-axis demonstrates the features. These plots visually illustrate the distribution and variability of feature impacts across instances, allowing intuitive comparisons between features and classes without summarizing the values numerically.

Figure 2. Results of Confusion Matrix



Based on Figure 2, the most influential sensors for the Normal class are Sensor_12, Sensor_11, and Sensor_4 that are sorted by their importance on predicting this class. On the other hand, sensor_17, sensor_14 and sensor_3 have the least effect on prediction. This plot presents that higher values of Sensor_12 (red color) significantly push predictions toward Normal class, while lower values (Blue color) tend to move predictions away from this class. For sensor_11 and sensor_4 the low values increase the SHAP value and pushes toward Normal. A similar interpretation approach can be used to the SHAP plots for the Warning (Class 1) and Critical (Class 2) categories, where the most and least influential sensors can be distinguished, and the outcome of high and low sensor values on class predictions can be analyzed. Table 5 demonstrates the parameters of the most influential sensors in all categories.

By determining the most influential sensors through XAI methods, managers and maintenance teams can make better decisions and allocate resources more efficiently. This helps them concentrate on the most critical components, ensure smooth engine operation, and prevent unexpected shutdowns. It also enhances maintenance effectiveness, reducing downtime and improving overall operations (Hong et al., 2020).

Table 5. Key Most Influential Sensor Parameters

Sensor	Symbol	Description
Sensor_4	T50	Total temperature at LPT outlet
Sensor_7	P30	Total pressure at HPC outlet
Sensor_8	Nf	Physical fan speed
Sensor_11	Ps30	Static pressure at HPC outlet
Sensor_12	Phi	Ratio of fuel flow to Ps30

5 CONCLUSION

The current study has expressed an LSTM-based model for RUL classification, demonstrating strong predictive performance. The model gains an overall accuracy of 90%, outperforming traditional machine learning methods such as

Random Forest (81%) and Logistic Regression (80%). The classification results represent high precision and recall for Normal and Critical states, emphasizing the model's reliability in distinguishing operational conditions. Moreover, SHAP analysis was applied to interpret feature significance, highlighting fundamental sensors contributing to model predictions. The results confirmed that sensors 12 and 11 have the most influence on the prediction of all classes in this research. These findings suggest that DL approaches, especially LSTM networks, effectively capture complex temporal dependencies in sensor data, making them highly applicable for real-world PdM cases. The resulting explainable AI method determines the health state by predicting the RUL. By determining the most influential sensors through deep SHAP, the method allows for explainable maintenance decisions to allocate resources more efficiently.

Future work will explore hybrid models and further optimization strategies to strengthen the overall performance of the proposed explainable LSTM model.

Figure 3. SHAP Analysis: Normal Class

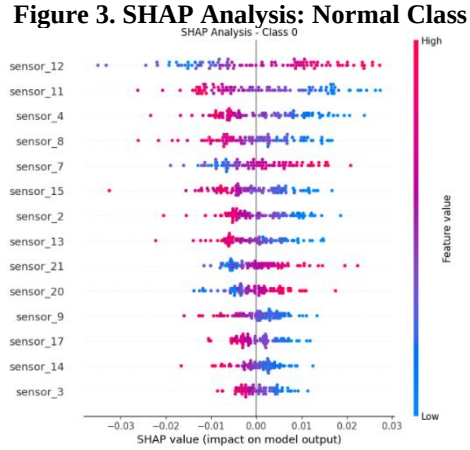


Figure 4. SHAP Analysis: Warning Class

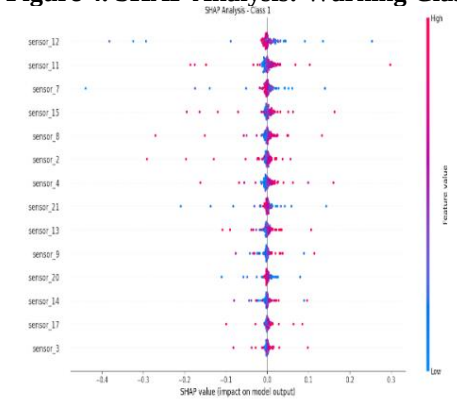
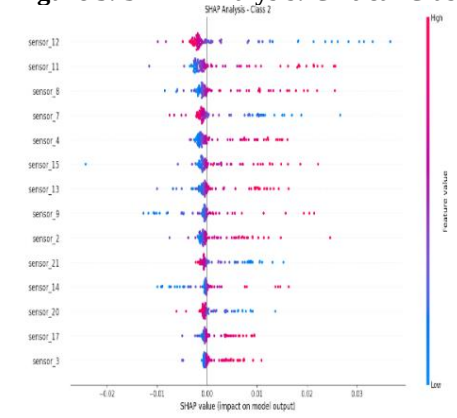


Figure 5. SHAP Analysis: Critical Class



6 References

Ahmed, I., Jeon, G., & Piccialli, F. (2022). From Artificial Intelligence to Explainable Artificial Intelligence in Industry 4.0: A Survey on What, How, and Where. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *18*(8). https://doi.org/10.1109/TII.2022.3146552

Azari, M. S., Flammini, F., Santini, S., & Caporuscio, M. (2023). A systematic literature review on transfer learning for predictive maintenance in industry 4.0. *IEEE Access*, *11*, 12887–12910.

Bekkaoui, M., Karray, M.-H., & Sari, Z. (2015). Knowledge formalization for experts' selection into a collaborative maintenance platform. *IFAC-PapersOnLine*, *48*(3), 1445–1450. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.290

Cholette, M. E., Yu, H., Borghesani, P., Ma, L., & Kent, G. (2019). Degradation modeling and condition-based maintenance of boiler heat exchangers using gamma processes. *Reliability Engineering & System Safety*, *183*, 184–196. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.11.023

Dehghan Shoorkand, H., Nourelfath, M., & Hajji, A. (2023). A deep learning approach for integrated production planning and predictive maintenance. *International Journal of Production Research*, *61*(23), 7972–7991.

Ferraro, A., Galli, A., Moscato, V., & Sperlì, G. (2023). Evaluating eXplainable artificial intelligence tools for hard disk drive predictive maintenance. *Artificial Intelligence Review*, *56*(7), 7279–7314. https://doi.org/10.1007/s10462-022-10354-7

Hassani.N, S. M. M., Jin, X., & Ni, J. (2019). Physics-based Gaussian process for the health monitoring for a rolling bearing. *Acta Astronautica*, *154*, 133–139. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.10.029

Hesabi, H., Nourelfath, M., & Hajji, A. (2022). A deep learning predictive model for selective maintenance optimization. *Reliability Engineering and System Safety*, *219*. https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108191

Hochreiter, S. (1997). Long Short-term Memory. *Neural Computation MIT-Press*.

Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1996). LSTM can solve hard long time lag problems. *Advances in Neural Information Processing Systems*, *9*.

Hong, C. W., Lee, C., Lee, K., Ko, M.-S., Kim, D., & Hur, K. (2020). Remaining Useful Life Prognosis for Turbofan Engine Using Explainable Deep Neural Networks with Dimensionality Reduction. *Sensors (Switzerland)*, *20*, 1–19. https://doi.org/10.3390/s20226626

Işık, B. (2023). Knowledge-Based Maintenance Management System of Compressed Air System. *International Symposium on Industrial Engineering and Automation*, 197–208.

Jimenez, J. J. M., Schwartz, S., Vingerhoeds, R., Grabot, B., & Salaün, M. (2020). Towards multi-model approaches to predictive maintenance: A systematic literature survey on diagnostics and prognostics. *Journal of Manufacturing Systems*, *56*, 539–557.

Kang, Z., Catal, C., & Tekinerdogan, B. (2021). Remaining useful life (RUL) prediction of equipment in production lines using artificial neural networks. *Sensors*, *21*(3), 932.

Lee, D., Siu, V., Cruz, R., & Yetman, C. (2016). Convolutional neural net and bearing fault analysis.

Proceedings of the International Conference on Data Science (ICDATA), 194.

Liu, J., Li, Q., Chen, W., Yan, Y., Qiu, Y., & Cao, T. (2019). Remaining useful life prediction of PEMFC based on long short-term memory recurrent neural networks. *International Journal of Hydrogen Energy*, *44*(11), 5470–5480. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.042

Loshchilov, I. (2017). Decoupled weight decay regularization. *ArXiv Preprint ArXiv:1711.05101*.

Lundberg, S. M., & Lee, S.-I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*, *30*.

Manchadi, O., Ben-Bouazza, F., & Jioudi, B. (2023). Predictive maintenance in healthcare system: a survey. *IEEE Access*.

Mangalathu, S., Hwang, S.-H., & Jeon, J.-S. (2020). Failure mode and effects analysis of RC members based on machine-learning-based SHapley Additive exPlanations (SHAP) approach. *Engineering Structures*, *219*. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110927

Mao, A., Mohri, M., & Zhong, Y. (2023). Cross-entropy loss functions: Theoretical analysis and applications. *International Conference on Machine Learning*, 23803–23828.

Nayak, R., & Jaidhar, C. D. (2023). Employing Feature Extraction, Feature Selection, and Machine Learning to Classify Electricity Consumption as Normal or Electricity Theft. *SN Computer Science*, *4*(5), 483. https://doi.org/10.1007/s42979-023-01911-0

Pan, Y., Hong, R., Chen, J., Singh, J., & Jia, X. (2019). Performance degradation assessment of a wind turbine gearbox based on multi-sensor data fusion. *Mechanism and Machine Theory*, *137*, 509–526. https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.03.036

Panch, T., Szolovits, P., & Atun, R. (2018). Artificial intelligence, machine learning and health systems. *Journal of Global Health*, *8*(2).

Park, D., Kim, S., An, Y., & Jung, J.-Y. (2018). LiReD: A Light-Weight Real-Time Fault Detection System for Edge Computing Using LSTM Recurrent Neural Networks. *Sensors*, *18*(7), 2110. https://doi.org/10.3390/s18072110

Pieri, G., Klein, M. R., & Milanese, M. (2001). A knowledge based system for the maintenance of chemical plants and its implementation using OPTRANS. *Engineering of Intelligent Systems: 14th International Conference on Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems, IEA/AIE 2001 Budapest, Hungary, June 4–7, 2001 Proceedings 14*, 777–790.

Qu, J., Liu, F., Ma, Y., & Fan, J. (2019). A Neural-Network-Based Method for RUL Prediction and SOH Monitoring of Lithium-Ion Battery. *IEEE Access*, *7*, 87178–87191. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2925468

Sateesh Babu, G., Zhao, P., & Li, X.-L. (2016). Deep convolutional neural network based regression approach for estimation of remaining useful life. *Database Systems for Advanced Applications: 21st International Conference, DASFAA 2016, Dallas, TX, USA, April 16-19, 2016, Proceedings, Part I 21*, 214–228.

Saxena, A., Goebel, K., Simon, D., & Eklund, N. (2008). Damage propagation modeling for aircraft engine run-to-failure simulation. *2008 International Conference on Prognostics and Health Management*, 1–9.

Senoner, J., Netland, T., & Feuerriegel, S. (2021). Using Explainable Artificial Intelligence to Improve Process Quality: Evidence from Semiconductor Manufacturing. *Management Science*, *68*(8), 5704–5723. https://doi.org/10.1287/mnsc.2021.4190

Serradilla, O., Zugasti, E., Cernuda, C., Aranburu, A., Okariz, J. R. de, & Zurutuza, U. (2020). Interpreting Remaining Useful Life estimations combining Explainable Artificial Intelligence and domain knowledge in industrial machinery. *2020 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, 1–8. https://doi.org/10.1109/FUZZ48607.2020.9177537

Shaheen, B., Kocsis, Á., & Németh, I. (2023). Data-driven failure prediction and RUL estimation of mechanical components using accumulative artificial neural networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *119*, 105749. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105749

Shantal, M., Othman, Z., & Bakar, A. A. (2023). A novel approach for data feature weighting using correlation coefficients and min–max normalization. *Symmetry*, *15*(12), 2185.

Siami-Namini, S., Tavakoli, N., & Namin, A. S. (2019). The performance of LSTM and BiLSTM in forecasting time series. *2019 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, 3285–3292.

Sokolova, M., & Lapalme, G. (2009). A systematic analysis of performance measures for classification tasks. *Information Processing and Management*, *45*(4), 427–437. https://doi.org/10.1016/j.ipm.2009.03.002

Soni, P., Khan, M. A., Zubair, M., & Garg, S. K. (2021). Multiclass classification for predicting Remaining Useful Life (RUL) of the turbofan engine. *2021 11th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence)*, 1023–1028.

Wang, J., Zhuang, J., Duan, L., & Cheng, W. (2016). A multi-scale convolution neural network for featureless fault diagnosis. *2016 International Symposium on Flexible Automation (Isfa)*, 65–70.

Youness, G., & Aalah, A. (2023). An Explainable Artificial Intelligence Approach for Remaining Useful Life Prediction. *Aerospace*, *10*(5), 474. https://doi.org/10.3390/aerospace10050474

Zhang, W., Yang, D., & Wang, H. (2019). Data-Driven Methods for Predictive Maintenance of Industrial Equipment: A Survey. *IEEE Systems Journal*, *13*(3), 2213–2227. https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2905565

Zheng, S., Ristovski, K., Farahat, A., & Gupta, C. (2017). Long Short-Term Memory Network for Remaining Useful Life estimation. *2017 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM)*, 88–95. https://doi.org/10.1109/ICPHM.2017.7998311

Zheng, Y., Liu, Q., Chen, E., Ge, Y., & Zhao, J. L. (2014). Time Series Classification Using Multi-Channels Deep Convolutional Neural Networks. In F. Li, G. Li, S. Hwang, B. Yao, & Z. Zhang (Eds.), *Web-Age Information Management* (pp. 298–310). Springer International Publishing.

CIGI QUALITA MOSIM 2025

Combined Maintenance Routing Problem: a literature review and solution method.

BIN WU[1], LAURENCE DIEULLE[1], NACIMA LABADIE[1]

[1] UTT- Computer Science and Digital Society Laboratory LIST3N
12 rue Marie Curie, CS 42060 10010 Troyes Cedex, France
bin.wu@utt.fr

Résumé – Ce travail est dédié au problème intégré de planification de la maintenance et élaboration de tournées des techniciens. Il présentera dans un premier temps les avancées récentes sur le sujet, puis exposera un problème type combinant le choix de la stratégie de maintenance à la définition des plans de routes pour la maintenance d'équipements dispersés géographiquement.
Le modèle de dégradation correspond à un processus Markovien et les techniciens sont supposés avoir des compétences différenciées. Un modèle mathématique MILP ainsi qu'une approche de résolution basée sur une méthode de descente sont ensuite présentés pour minimiser une fonction-objectif qui somme le coût total des tournées, les pénalités liées à l'état des machines dont les coûts liés à l'indisponibilité. Les modèles et méthodes développées sont évalués sur des instances adaptées de la littérature.

Mots clés –. Stratégies de maintenance, tournées de véhicules, MILP, métaheuristique.

Abstract –This work is dedicated to the combined maintenance and technician route-planning problem. It will first present recent advances on the subject, then focus on a typical problem where the goal is to determine simultaneously the best maintenance strategy and optimal route for carrying out maintenance tasks on assets spread across different locations.
The degradation model follows a Markov process, and technicians are assumed to have differentiated skills. A MILP model is then presented, together with a solution approach based on a descent method for minimising an objective function that sums the total cost of the routes, the penalties related to the machines' states and unavailability costs. The developed models and methods are evaluated on instances adapted from the literature

Keywords – Maintenance strategies, Vehicle Routing Problem, MILP, metaheuristic.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Quantum circuit for exponentiation of Hamiltonians[1]

GERARD FLEURY AND PHILIPPE LACOMME

LIMOS - UMR 6158
Campus des Cézeaux
1 rue de la Chebarde
TSA 60125 - CS 60026
63178 Aubière cedex France

Résumé

Dans cet article nous nous intéressons à l'exponentiation d'Hamiltoniens composés de portes de Pauli, en introduisant une approche algorithmique. L'exponentiation des Hamiltoniens est une étape importante qui permet de produire une solution de l'équation de Schrödinger et qui est le fondement des méthodes adiabatiques et plus récemment de QAOA. Nous allons montrer qu'il existe une approche systématique simple et efficace pour obtenir des circuits compacts et facilement implémentables.

Mots clés – Schrödinger, exponentiation of operators

Abstract

In this article, we focus on the exponentiation of Hamiltonians composed of Pauli gates, by introducing an algorithmic approach. The exponentiation of the Hamiltonian is a crucial step that provides a solution to the Schrödinger equation and forms the foundation of both Adiabatic methods and, more recently, QAOA. We will demonstrate that there exists a simple and efficient systematic approach to obtain compact circuits that are easy to implement.

Keywords – Schrödinger, exponentiation des opérateurs

1. INTRODUCTION

As introduced by (Schrödinger, 1926), the evolution of a quantum-mechanical system's wave function is described by the equation:

$$\frac{\partial .}{\partial t}|\psi(x,t)\rangle = -i.\hbar\,.H(t).|\psi(x,t)\rangle$$

where $H(t)$ represents the system's Hamiltonian (energy operator), where $\hbar$ is derived from Plank constant and where $|\psi(x,t)\rangle$ are the states vectors. If $H(t)$ is time dependent the solution is given by:

$$|\psi_t\rangle = e^{-i.\hbar.\int_0^T H(u).du}.|\psi_0\rangle$$

So that describing a problem with a Hamiltonian H and an initial state $|\psi_0\rangle$ allows to compute the ground state.

A specific solution can be found by considering an iterative approximation of the Schrödinger equation, making use of a particular Hamiltonian H Hamiltonian (involving Z_i, and $Z_i.Z_j$ operators). In Adiabatic Quantum Optimization, the system is required to evolve slowly into the ground state of a Hamiltonian H_D often called the "driver Hamiltonian": this Hamiltonian should not commute with the one modeling the combinatorial problem. The system must then be adiabatically tuned from H_D to H_P through an interpolation involving a parameter $s(t)$ a which smoothly decreases from 1 to 0:

$H(t) = s(t).H_D + [1 - s(t)].H_P$ (Farih et al., 2000).

However, Adiabatic Quantum Optimization and other quantum annealing approaches are limited to small-scale instances due to the slow evolution required between H_D to H_P. In 2014 (Farih et al., 2014) introduced a new approach known as the Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA), which provides a more efficient decomposition scheme. QAOA has garnered significant attention, with notable works by (Farhi and Harrow, 2019), (Yang et al., 2017), (Jiang et al., 2017), (Wecker et al., 2016), and (Wang et al., 2018). In a recent study (Farhi and Harrow, 2019), it was shown that the output distribution produced by QAOA cannot be efficiently approximated by any classical algorithm due to the inherent complexity of the required algorithms.

In recent years, QAOA has drawn considerable interest from researchers, as it is seen as a potential candidate for demonstrating quantum supremacy, as emphasized by (Farhi and Harrow, 2019). Quantum supremacy refers to the ability of a quantum circuit to produce results that require an exponentially larger number of classical operations to replicate.

[1] A preprint including all the demonstrations is on Arxiv

The Hamiltonian H maps the function f with 2^n eigenvalues that model the 2^n values of f. The optimal solution (i.e. the extremal value of f) is an eigenvalue of H and H is satisfying:

$$H.|x\rangle = f(x)|x\rangle$$

Because a Hamiltonian is a Hermitian operator it has a spectral decomposition: $H = \sum_i \ e_i \, |e_i\rangle\langle e_i|$ where $|e_i\rangle$ is the i^{th} basis vector. The Hamiltonian is defined with Pauli operator-basis and takes advantages of the Pauli Z leading to expression

$$H = \alpha_0.Id + \alpha_1.Z_0.Z_1 + \alpha_2.Z_0.Z_2 \ldots$$

where α_i are real numbers.

Note that Hadfield in 2021 (Hadfield, 2021) gives a concise description of rules for composing Hamiltonians representing clauses that model clauses or functions including Boolean formulas. A Hamiltonian is implemented into a quantum circuit by deriving $U_H(t) = e^{-i.t.H}$ with $t \in [0; 2\pi]$ and using both CNOT and Z-rotations. t refers to the weight in the iterative search process of QAOA.

The Trotterization defines

$$e^{-i.t.H} = e^{-i.t.(H_1+\cdots+H_n)} \simeq \prod_{p=1}^{n} e^{-i.t.H_p}$$

with $H_p = U_1 \otimes U_2 \otimes \ldots \otimes U_n$ and $U_k \in \{Id, X, Y, Z\}$ and the difficulties in $e^{-i.t.H_p}$ lie on the computation of expression such that $e^{-i.t.U_1 \otimes U_2 \otimes \ldots \otimes U_n}$ that is the exponentiation of H_p.

2. BASIC CONCEPTS FOR $e^{-i.t.Z_j.Y_k.X_m}$ COMPUTATION

2.1. Pauli gate properties

Definition

A quantum circuit Q is a proper exponentiation of one Hamiltonian H if the matrix representation of $e^{i.\theta.H}$ is the same that the matrix representation of Q.

Example

Let us consider $H_p = X_1.Z_2$ and $e^{-i.t.X_1.Z_2}$ with 2 qubits only

Let us prove that $Q = CZ_{1,2}.(R_X(-2.t) \otimes Id).CZ_{1,2}$ is the quantum circuit of $e^{-i.\gamma.X_1.Z_2}$

Proof.

We have

$$CZ_{1,2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

and

$$(R_X(-2.t) \otimes Id) = \begin{pmatrix} \cos t & i.\sin t \\ i.\sin t & \cos t \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$(R_X(-2.t) \otimes Id).CZ_{1,2} = \begin{pmatrix} \cos t & & i.\sin t & 0 \\ & \cos t & 0 & i.\sin t \\ i.\sin t & 0 & \cos t & \\ 0 & i.\sin t & & \cos t \end{pmatrix} . \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$(R_X(2.t) \otimes Id).CZ_{1,2} = \begin{pmatrix} \cos t & & i.\sin t & 0 \\ & \cos t & 0 & -i.\sin t \\ i.\sin t & 0 & \cos t & \\ 0 & i.\sin t & & -\cos t \end{pmatrix}$$

and

$$CZ_{1,2}.(R_X(2.t) \otimes Id).CZ_{1,2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} . \begin{pmatrix} \cos t & & i.\sin t & 0 \\ & \cos t & 0 & -i.\sin t \\ i.\sin t & 0 & \cos t & \\ 0 & i.\sin t & & -\cos t \end{pmatrix}$$

$$CZ_{1,2}.(R_X(2.t) \otimes Id).CZ_{1,2} = \begin{pmatrix} \cos 2 & & i.\sin t & 0 \\ & \cos t & 0 & -i.\sin t \\ i.\sin 2 & 0 & \cos t & \\ 0 & -i.\sin t & & \cos t \end{pmatrix}$$

On other hand

$$X_1.Z_2 = \begin{pmatrix} & & 1 & \\ & & & 1 \\ 1 & & & \\ & 1 & & \end{pmatrix} . \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & -1 & & \\ & & 1 & \\ & & & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} & & 1 & \\ & & & 1 \\ 1 & & & \\ & 1 & & \end{pmatrix}$$

and

$$e^{i.t.X_1.Z_2} = \cos t \, . Id + i.\sin t \, . (X_1.Z_2)$$

$$e^{i.t.X_1.Z_2} = \cos\gamma \, . \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & 1 & \\ & & & 1 \end{pmatrix} + i.\sin\gamma \, . \begin{pmatrix} & & 1 & \\ & & & 1 \\ 1 & & & \\ & 1 & & \end{pmatrix}$$

$$e^{i.t.X_1.Z_2} = \begin{pmatrix} \cos t & 0 & i.\sin t & 0 \\ 0 & \cos t & 0 & -i.\sin t \\ i.\sin t & 0 & \cos t & 0 \\ 0 & -i.\sin t & 0 & \cos t \end{pmatrix}$$

So we conclude

$$e^{i.t.X_1.Z_2} = CZ_{1,2}.(R_X(-2.t) \otimes Id).CZ_{1,2}$$

In the literature, several common exponentiations are used including for example

$$CX_{1,2}.[Id \otimes R_Z(-2.t)].CX_{1,2} = CX_{2,1}.[R_Z(-2.t) \otimes Id].CX_{2,1} = e^{i.t.(Z \otimes Z)}$$

The calculation of $e^{-i.t.Z_{j_p}.Y_{k_p}.X_{m_p}}$ is tedious, and verifying the calculations requires manipulating matrices whose size increases rapidly with the number of qubits. Therefore, there is a need to have a more compact representation of the calculations so that the corresponding circuit can be automated. We propose to use calculations using tensor products and a simple understandable algorithm to obtain the circuit.

2.2. Proposition

Theorem 1

$$\left(Id^{\otimes n-2} \otimes CX_{n,n-1}\right).\left(Id^{\otimes n-3} \otimes CX_{n-1,n-2} \otimes Id\right) \ldots \left(CX_{2,1} \otimes Id^{\otimes n-2}\right).R_Z(2t).\left(CX_{2,1} \otimes Id^{\otimes n-2}\right) \ldots \left(Id^{\otimes n-3} \otimes CX_{n-1,n-2} \otimes Id\right).\left(Id^{\otimes n-2} \otimes CX_{n,n-1}\right) = e^{-i.t.Z \otimes Z \otimes \ldots \otimes Z} = e^{-i.t.Z^{\otimes n}}$$

Proof

In the specific case $n = 1$

Since we have $e^{-i.t.Z} = R_Z(2.t)$ then

$$R_Z(2.t) = \begin{pmatrix} e^{-i.\frac{t}{2}} & 0 \\ 0 & e^{i.\frac{t}{2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\frac{t}{2} & 0 \\ 0 & \cos\frac{t}{2} \end{pmatrix} - i.\begin{pmatrix} \sin\frac{t}{2} & 0 \\ 0 & -\sin\frac{t}{2} \end{pmatrix}$$

$$R_Z(2.t).|0\rangle = \cos t\,.\,Id - i.\sin t\,.\,Z = e^{-i.t.Z}$$

Let us assume that

$$\begin{aligned}(Id^{\otimes n-2} \otimes CX_{n,n-1}).(Id^{\otimes n-3} \otimes CX_{n-1,n-2} \otimes Id) \dots (CX_{2,1} \otimes Id^{\otimes n-2}).R_Z(2t).(CX_{2,1} \otimes Id^{\otimes n-2}) \dots (Id^{\otimes n-3} \otimes CX_{n-1,n-2} \otimes Id).(Id^{\otimes n-2} \otimes CX_{n,n-1}) \\ = e^{-i.t.Z\otimes Z\otimes \dots \otimes Z} = e^{-i.t.Z^{\otimes n}}\end{aligned}$$

is true and let us demonstrate that the equality is true for $n+1$.

By hypothesis the following equality is assume to be valid:

$$\begin{aligned}(Id^{\otimes n-2} \otimes CX_{n,n-1}).(Id^{\otimes n-3} \otimes CX_{n-1,n-2} \otimes Id) \dots (CX_{2,1} \otimes Id^{\otimes n-2}).[R_Z(2t) \otimes Id^{\otimes n-1}].(CX_{2,1} \otimes Id^{\otimes n-2}) \dots (Id^{\otimes n-3} \otimes CX_{n-1,n-2} \otimes Id).(Id^{\otimes n-2} \otimes CX_{n,n-1}) = e^{-i.t.Z^{\otimes n}}\end{aligned}$$

By consequence we can multiply by $(Id^{\otimes n-1} \otimes CX_{n+1,n})$ at the left and and righ of the equality:

$$\begin{aligned}(Id^{\otimes n-1} \otimes CX_{n+1,n}).[(Id^{\otimes n-2} \otimes CX_{n,n-1}).(Id^{\otimes n-3} \otimes CX_{n-1,n-2} \otimes Id) \dots (CX_{2,1} \otimes Id^{\otimes n-2}).[R_Z(2t) \otimes Id^{\otimes n-1}].(CX_{2,1} \otimes Id^{\otimes n-2}) \dots (Id^{\otimes n-3} \otimes CX_{n-1,n-2} \otimes Id).(Id^{\otimes n-2} \otimes CX_{n,n-1})].(Id^{\otimes n-1} \otimes CX_{n+1,n})\end{aligned}$$

which can be rewritten:

$$H_1 = (Id^{\otimes n-1} \otimes CX_{n+1,n}).\left[e^{-i.t.Z^{\otimes n}} \otimes Id\right].(Id^{\otimes n-1} \otimes CX_{n+1,n})$$

It is possible to apply the circuit to $|q_1q_2 \dots q_{n-1}q_nq_{n+1}\rangle$ considering :

- first $|q_1q_2 \dots q_{n-1}q_n0\rangle$
- second $|q_1q_2 \dots q_{n-1}01\rangle$
- last $|q_1q_2 \dots q_{n-1}11\rangle$

Let us consider $|q_1q_2 \dots q_{n-1}q_n0\rangle$

We have

$$\begin{aligned}H_1.|q_1q_2 \dots q_{n-1}q_n0\rangle &= (Id^{\otimes n-1} \otimes CX_{n+1,n}).\left[e^{-i.t.Z^{\otimes n}} \otimes Id\right].(Id^{\otimes n-1} \otimes CX_{n+1,n}).|q_1q_2 \dots q_n0\rangle \\ H_1.|q_1q_2 \dots q_{n-1}q_n0\rangle &= (Id^{\otimes n-1} \otimes CX_{n+1,n}).\left[e^{-i.t.Z^{\otimes n}} \otimes Id\right].|q_1q_2 \dots q_n0\rangle \\ H_1.|q_1q_2 \dots q_{n-1}q_n0\rangle &= (Id^{\otimes n-1} \otimes CX_{n+1,n}).[\cos(t).|q_1q_2 \dots q_n\rangle \otimes |0\rangle - i.\sin(t).(Z^{\otimes n}.|q_1q_2 \dots q_n\rangle) \otimes |0\rangle]\end{aligned}$$

Because $Z.|0\rangle = |0\rangle$, we have

$$\begin{aligned}H_1.|q_1q_2 \dots q_{n-1}q_n0\rangle &= \cos(t).|q_1q_2 \dots q_n\rangle \otimes |0\rangle - i.\sin(t).(Z^{\otimes n}.|q_1q_2 \dots q_n\rangle) \otimes Z.|0\rangle \\ H_1.|q_1q_2 \dots q_{n-1}q_n0\rangle &= \cos(t).|q_1q_2 \dots q_n0\rangle - i.t.\sin(t).\left(Z^{\otimes n+1}.|q_1q_2 \dots q_n0\rangle\right) \\ H_1.|q_1q_2 \dots q_{n-1}q_n0\rangle &= e^{-i.t.Z^{\otimes n+1}}.|q_1q_2 \dots q_n0\rangle\end{aligned}$$

This result prove that H_1 applied to any quantum state where the last qubit in position $n+1$ is 0 compute $e^{-i.t.Z^{\otimes n+1}}$.

Let us consider $|q_1q_2 \dots q_{n-1}01\rangle$

$$\begin{aligned}H_1.|q_1q_2 \dots q_{n-1}01\rangle &= (Id^{\otimes n-1} \otimes CX_{n+1,n}).\left[e^{-i.t.Z^{\otimes n}} \otimes Id\right].(Id^{\otimes n-1} \otimes CX_{n+1,n}).|q_1q_2 \dots q_{n-1}01\rangle\end{aligned}$$

Because $X.|0\rangle = |1\rangle$ we have:

$$\begin{aligned}H_1.|q_1q_2 \dots q_{n-1}01\rangle &= (Id^{\otimes n-1} \otimes CX_{n+1,n}).\left[e^{-i.t.Z^{\otimes n}} \otimes Id\right].|q_1q_2 \dots q_{n-1}11\rangle\end{aligned}$$

then

$$\begin{aligned}H_1.|q_1q_2 \dots q_{n-1}01\rangle &= (Id^{\otimes n-1} \otimes CX_{n+1,n}).[\cos(t).|q_1q_2 \dots q_{n-1}1\rangle \otimes |1\rangle - i.\sin(t).(Z^{\otimes n}).|q_1q_2 \dots q_{n-1}1\rangle) \otimes |1\rangle]\end{aligned}$$

Because $Z.|0\rangle = |0\rangle$ and $Z.|1\rangle = -|1\rangle$, we have:

$$\begin{aligned}H_1.|q_1q_2 \dots q_{n-1}01\rangle &= (Id^{\otimes n-1} \otimes CX_{n+1,n}).[\cos(t).|q_1q_2 \dots q_{n-1}\rangle + i.\sin(t).(Z^{\otimes n-1}.|q_1q_2 \dots q_{n-1}\rangle)] \otimes |11\rangle\end{aligned}$$

and

$$\begin{aligned}H_1.|q_1q_2 \dots q_{n-1}01\rangle &= \cos(t).|q_1q_2 \dots q_{n-1}01\rangle - i.\sin(t).(Z^{\otimes n+1})|q_1q_2 \dots q_{n-1}01\rangle \\ H_1.|q_1q_2 \dots q_{n-1}01\rangle &= e^{-i.t.Z^{\otimes n+1}}.|q_1q_2 \dots q_n01\rangle\end{aligned}$$

This result prove that H_1 applied to any quantum state where the two last qubits is $|01\rangle$ computes $e^{-i.t.Z^{\otimes n+1}}$.

Let us consider $|q_1q_2 \dots q_{n-1}11\rangle$

We have

$$\begin{aligned}H_1.|q_1q_2 \dots q_{n-1}11\rangle &= (Id^{\otimes n-1} \otimes CX_{n+1,n}).\left[e^{-i.t.Z^{\otimes n}} \otimes Id\right].(Id^{\otimes n-1} \otimes CX_{n+1,n}).|q_1q_2 \dots q_{n-1}11\rangle \\ H_1.|q_1q_2 \dots q_{n-1}11\rangle &= (Id^{\otimes n-1} \otimes CX_{n+1,n}).\left[e^{-i.t.Z^{\otimes n}} \otimes Id\right].|q_1q_2 \dots q_{n-1}01\rangle\end{aligned}$$

and

$$\begin{aligned}H_1.|q_1q_2 \dots q_{n-1}11\rangle &= (Id^{\otimes n-1} \otimes CX_{n+1,n}).[\cos(t).|q_1q_2 \dots q_{n-1}0\rangle \otimes |1\rangle - i.\sin(t).(Z^{\otimes n}.|q_1q_2 \dots q_{n-1}0\rangle) \otimes |1\rangle]\end{aligned}$$

Because $Z.|0\rangle = |0\rangle$ we have:

$$\begin{aligned}H_1.|q_1q_2 \dots q_{n-1}11\rangle &= (Id^{\otimes n-1} \otimes CX_{n+1,n}).[\cos(t).|q_1q_2 \dots q_{n-1}\rangle - i.\sin(t).(Z^{\otimes n-1}.|q_1q_2 \dots q_{n-1}\rangle)] \otimes |01\rangle \\ H_1.|q_1q_2 \dots q_{n-1}11\rangle &= [\cos(t).|q_1q_2 \dots q_{n-1}\rangle - i.\sin(t).(Z^{\otimes n-1}.|q_1q_2 \dots q_{n-1}\rangle)] \otimes |11\rangle\end{aligned}$$

Since $Z.|1\rangle = -|1\rangle$ we have $Z \otimes Z.|11\rangle = |11\rangle$ and

$$H_1.|q_1q_2\ldots q_{n-1}11\rangle = \cos(t).|q_1q_2\ldots q_{n-1}11\rangle - i.t.\sin(t).(Z^{\otimes n+1})$$

$$H_1.|q_1q_2\ldots q_{n-1}11\rangle = e^{-i.t.Z^{\otimes n+1}}.|q_1q_2\ldots q_n01\rangle$$

This result proves that H_1 applied to any quantum state where the two last qubits is $|11\rangle$ computes $e^{-i.t.Z^{\otimes n+1}}$.

□

Remark

A quasi-direct application gives, for example:

$$Q = e^{-i.t.Z_j.Z_k.Z_m} = CX_{jk}.CX_{km}.RZ_m(2.t).CX_{km}.CX_{jk}$$

with

$Q = e^{-i.t.Z_j.Z_k.Z_m} = e^{-i.t(\ldots\otimes\ldots\otimes Z\otimes\ldots\otimes Z\otimes\ldots\otimes Z\otimes\ldots)}$ where the Pauli gate Z is applied on qubits number j,k,m

□

So it is possible to define the quantum circuit for $e^{-i.t.Z^{\otimes n}}$.

Theorem 2

Any $e^{-i.t.U_1\otimes U_2\otimes\ldots\otimes U_n}$ where $U_k = X$ can defined by application of $(Id^{\otimes k-1}\otimes H\otimes Id^{\otimes n-k})$ before and after $e^{-i.t.U_1\otimes U_2\otimes..U_{k-1}\otimes Z\otimes U_{k+1}\ldots\otimes U_n}$.

Theorem 3

Any $e^{-i.t.U_1\otimes U_2\otimes\ldots\otimes U_n}$ where $U_k = Y$ can defined by application of $(Id^{\otimes k-1}\otimes S\otimes Id^{\otimes n-k})$ before and$(Id^{\otimes k-1}\otimes S^\dagger\otimes Id^{\otimes n-k})$ after $e^{-i.t.U_1\otimes U_2\otimes..U_{k-1}\otimes X\otimes U_{k+1}\ldots\otimes U_n}$.

2.2. Algorithm

The algorithm 1 is composed of step 1 that is the initialization and one loop starting at step 2 and finishing at step 10. Step 1 is the initialization of the quantum circuit taking into account the Z gate only.

Algorithm 1. *Exponentiation_of_Hamiltonian*

Input: H_p : a Hamiltonian that is a tensor product of Pauli operators X, Y, Z, Id
t : a real parameter

Output: Q : the quantum circuit of $e^{-i.t.H_p}$

Begin

1 Define $Q = e^{-i.t.U_1\otimes U_2\otimes\ldots\otimes U_n}$ with $U_j = Z$ if $H_p[j] \neq Id$ (*theorem 1*)
2. **For** k in 1 ... n **do**
3 **If** $(H_p[k] = X)$ **Then**
4 Let $Q = (Id^{\otimes k-1}\otimes H\otimes Id^{\otimes n-k}).Q.(Id^{\otimes k-1}\otimes H\otimes Id^{\otimes n-k}) = H_k.Q.H_k$
5. **End If**
6 **If** $(H_p[k] = Y)$ **Then**
7 Let $Q = (Id^{\otimes k-1}\otimes H\otimes Id^{\otimes n-k}).Q.(Id^{\otimes k-1}\otimes H\otimes Id^{\otimes n-k}) = H_k.Q.H_k$
8 Let $Q = (Id^{\otimes k-1}\otimes S\otimes Id^{\otimes n-k}).Q.(Id^{\otimes k-1}\otimes S^\dagger\otimes Id^{\otimes n-k}) = S_k.Q.S_k^\dagger$
9 **End If**
10 **End For**

End

The loop iterates on H_p to scan sequentially the Pauli gates. If in position k we have a X gate, *i.e.* $H_p[k] = X$, then $(Id^{\otimes k-1}\otimes H\otimes Id^{\otimes n-k})$ must be added in front of the quantum circuit Q and $(Id^{\otimes k-1}\otimes H\otimes Id^{\otimes n-k})$ has to be added at the end of Q. This is achieved at step 4: $Q = (Id^{\otimes k-1}\otimes H\otimes Id^{\otimes n-k}).Q.(Id^{\otimes k-1}\otimes H\otimes Id^{\otimes n-k})$

This update inserts H at qubit k at rear and front of Q to define: $Q = H_k.Q.H_k$. If in position k we have a Y the condition at step 6 is true and then 2 operations are achieved at steps 7 and 8. The first one at step 7 which is the same operation than operation achieved at step 4 when a X gate is processed:

$$Q = (Id^{\otimes k-1}\otimes H\otimes Id^{\otimes n-k}).Q.(Id^{\otimes k-1}\otimes H\otimes Id^{\otimes n-k})$$

The second one at step 8 consist in adding S gate in rear of Q and $S^\dagger$ in front of Q: $S_k.Q.S_k^\dagger$

2.3. Example and validation with Qiskit

The objective is to check if the quantum circuit obtained by Algorithm 1 meets the quantum circuit generated by Qiskit. Let us consider with 6 qubits only: $H_p = Y_2.Y_4.X_6$.

Let us consider with 6 qubits only:

$$H_p = Y_2.Y_4.X_6$$

$$H_p = Id\otimes Y\otimes Id\otimes Y\otimes Id\otimes X$$

The Algorithm 1 initialize at line 1, the quantum circuit:

$$Q = e^{-i.t.(Id\otimes Z\otimes Id\otimes Z\otimes Id\otimes Z)} = CX_{6,4}.CX_{4,2}.RZ_2(2t).CX_{4,2}.CX_{6,4}$$

For $k = 2$, at line 7, the quantum circuit is updated:

$$Q = (Id\otimes H\otimes Id^{\otimes 4}).(CX_{6,4}.CX_{4,2}.RZ_2(2t).CX_{4,2}.CX_{6,4}).(Id\otimes H\otimes Id^{\otimes 4})$$

And at line 8, the circuit is:

$$Q = (Id\otimes S\otimes Id^{\otimes 4}).(Id\otimes H\otimes Id^{\otimes 4}).(CX_{6,4}.CX_{4,2}.RZ_2(2t).CX_{4,2}.CX_{6,4}).(Id\otimes H\otimes Id^{\otimes 4}).(Id\otimes S^\dagger\otimes Id^{\otimes 4})$$

$$Q = (Id\otimes S.H\otimes Id^{\otimes 4}).(CX_{6,4}.CX_{4,2}.RZ_2(2t).CX_{4,2}.CX_{6,4}).(Id\otimes H.S^\dagger\otimes Id^{\otimes 4})$$

For $k = 4$, at line 7 and 8, the quantum circuit is updated:

$$Q = (Id^{\otimes 3}\otimes S.H\otimes Id^{\otimes 2}).(Id\otimes S.H\otimes Id^{\otimes 4}).(CX_{6,4}.CX_{4,2}.RZ_2(2t).CX_{4,2}.CX_{6,4}).(Id\otimes H.S^\dagger\otimes Id^{\otimes 4}).(Id^{\otimes 3}\otimes H.S^\dagger\otimes Id^{\otimes 2})$$

That is

$$Q = (S_2.H_2.S_4.H_4).\left(CX_{6,4}.CX_{4,2}.RZ_2(2t).CX_{4,2}.CX_{6,4}\right).\left(H_2.S_2^{\dagger}.H_4.S_4^{\dagger}\right)$$

For $k = 4$, at line 4, the quantum circuit is updated:

$$Q = (S_2.H_2.S_4.H_4.H_6).\left(CX_{6,4}.CX_{4,2}.RZ_2(2t).CX_{4,2}.CX_{6,4}\right).\left(H_2.S_2^{\dagger}.H_4.S_4^{\dagger}.H_6\right)$$

It is possible to compare the quantum circuit we obtained with the quantum circuit provided by Qiskit using the following Python code:

```
hamiltonian3 = (1/4*X^I^Y^I^Y^I)
evo_time = Parameter('t')
evolution_op = (evo_time*hamiltonian3).exp_i()
num_time_slices = 1
trotterized_op = PauliTrotterEvolution(
                  trotter_mode='trotter',
                  reps=num_time_slices).convert(evolution_op)
trot_op_circ = trotterized_op.to_circuit()
print(trot_op_circ)
trot_op_circ_decomp = trot_op_circ.decompose()
print(trot_op_circ_decomp)
```

Note that the Hamiltonian has to be written in the reverse order of the mathematical formulation and Qiskit provides the detail of the circuit using the **decompose()** method. The result provided in Figure 1, gives a quantum circuit that meets the quantum circuit generated by application of algorithm 1.

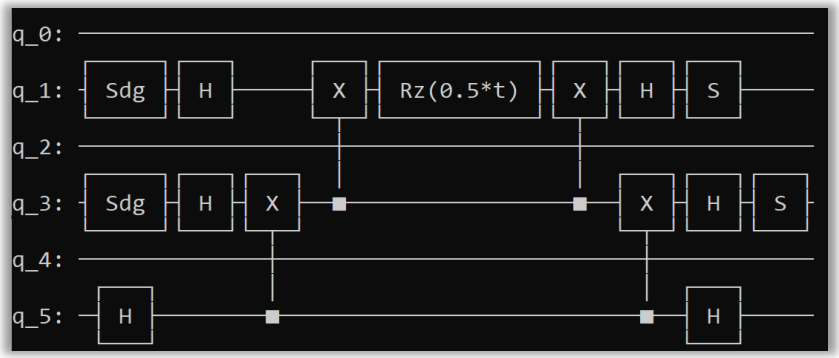


Figure 1. Qiskit exponentiation of $H_p = Y_2.Y_4.X_6$

Remarks

1. A similar algorithm could be defined starting with
$Q = e^{-i.t.U_1 \otimes U_2 \otimes \ldots \otimes U_n}$ with $U_j = X$ if $H_p[j] \neq Id$)
and switching X to Y using operator S and $S^{\dagger}$ and switching from X to Z using CX
2. A more compact algorithm could be defined starting with
$Q = e^{-i.t.U_1 \otimes U_2 \otimes \ldots \otimes U_n}$ with $U_j = X$ if $H_p[j] \in \{X, Y\}$ and $U_j = Z$ if $H_p[j] = Z$
and switching X to Y using operator S and $S^{\dagger}$

Example:

Let us consider $H_p = X \otimes Z \otimes Z \otimes Id \otimes Y$ and apply remark 1.

Step 1.
The Algorithm initialize the quantum circuit using X gates only:

$$Q = e^{-i.t.(X \otimes X \otimes X \otimes Id \otimes X)}$$

that is introduced in Figure 2.

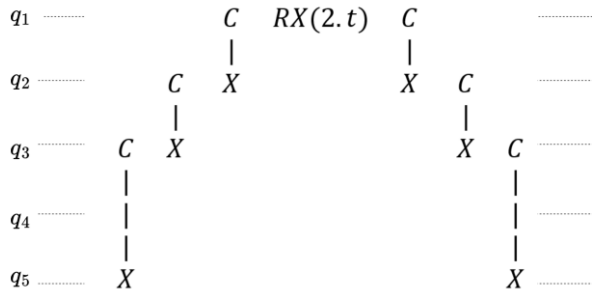


Figure 2. Quantum circuit for $e^{-i.t.(X \otimes X \otimes X \otimes Id \otimes X)}$

Step 2 Using H we switch X into Z to generate $e^{i.t.X \otimes Z \otimes Z \otimes Id \otimes X}$ and to obtain the quantum circuit of Figure 3.

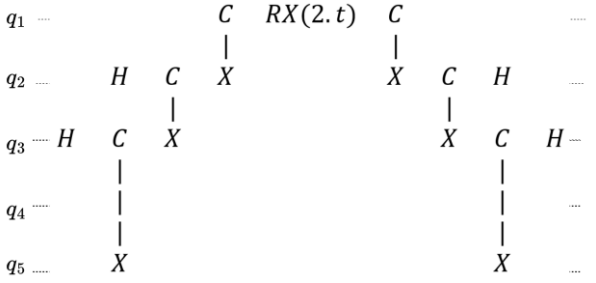


Figure 3. Quantum circuit for $e^{i.t.X \otimes Z \otimes Z \otimes Id \otimes X}$

Step 3 Using S and $S^{\dagger}$ we switch X into Y to generate $e^{i.t.X\otimes Z\otimes Z\otimes Id\otimes Y}$ and to obtain the quantum circuit of Figure 4.

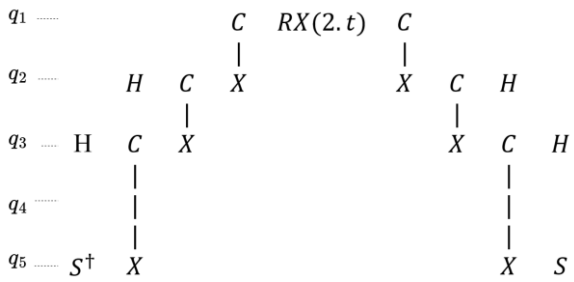


Figure 4. Quantum circuit for $e^{i.t.X\otimes Z\otimes Z\otimes Id\otimes Y}$

Remark

A more compact algorithm could be defined starting with $Q = e^{-i.t.U_1\otimes U_2\otimes \ldots \otimes U_n}$ with $U_j = X$ if $H_p[j] \in \{X, Y\}$ and $U_j = Z$ if $H_p[j] = Z$ and switching X to Y using operator S and $S^{\dagger}$

Example:

Let us consider $H_p = X \otimes Z \otimes Z \otimes Id \otimes Y$ and apply remark 1.

Step 1.

The Algorithm initialize the quantum circuit using X and Z gates:

$$Q = e^{-i.t.(X\otimes Z\otimes Z\otimes Id\otimes X)}$$

that is introduced in Figure 5.

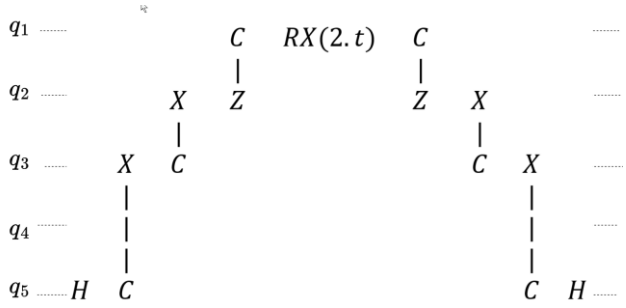


Figure 5. Quantum circuit for $e^{-i.t.(X\otimes Z\otimes Z\otimes Id\otimes X)}$

Step 2 Using $H.S$ and $S^{\dagger}.H$ we switch X into Y to generate $e^{i.t.X\otimes Z\otimes Z\otimes Id\otimes Y}$ and to obtain the quantum circuit of Figure 6.

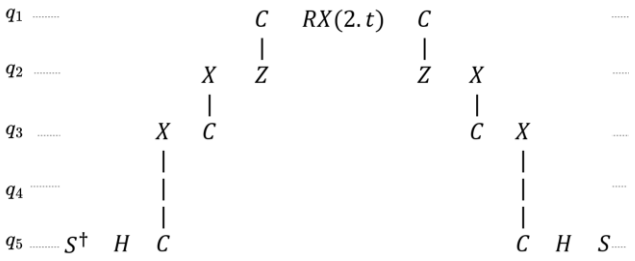


Figure 5. Quantum circuit for $e^{-i.t.(X\otimes Z\otimes Z\otimes Id\otimes Y)}$

3. CONCLUSION

In conclusion, the proposed algorithm for exponentiating quantum circuits gives a short and understandable description of a solution to define exponentiation of quantum circuits. The justification of the algorithm and the calculations performed rely exclusively on tensor computations, providing concise explanations while avoiding costly matrix manipulations. Experimental results demonstrate its correctness in defining quantum circuit that meet the Qiskit library proposal. Proposing a simple algorithm should make it easier for computer scientists to understand, offering a more algorithmic rather than mathematical perspective on how to create exponentials of quantum

4. REFERENCES

Schrödinger E. (1926). An Undulatory Theory of the Mechanics of Atoms and Molecules". *Physical Review*. 28(6), 1049–1070.

Farhi E. and Goldstone J. A. (2014). Quantum Approximate Optimization Algorithm. *arXiv*:1411.4028.

Farhi E. & Harrow A.W. (2019). Quantum supremacy through the Quantum Approximate Optimization Algorithm. *arXiv*:1602.07674.

Hadfield S. (2021). On the representation of Boolean and real functions as Hamiltonians for quantum computing. *arXiv*:1804.09130v2.

Jiang Z., Rieffel E.G. & Wang Z. (2017). Near-optimal quantum circuit for Grover's unstructured search using a transverse field". *Physical Review A*. 95(6), 062317.

Wang Z., Hadfield S., Jiang Z. & Rieffel E.G. (2018). Quantum approximate optimization algorithm for MaxCut: A fermionic view. *Physical Review A*. 97(2), 022304.

Wecker D., Hastings M. B. & Troyer M. (2016). Training a quantum optimizer. *Physical Review A*. 94(2), 022309.

Yang Z.-C., Rahmani A., Shabani A., Neven H. & Chamon C. (2017). Optimizing variational quantum algorithms using Pontryagin's minimum principle. *Physical Review X*. 7(2), 021027.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Exact Algorithms for coupling maintenance-production scheduling in a bilevel approach

QUENTIN SCHAU[1,2], OLIVIER PLOTON[1], VINCENT T'KINDT[1], FEDERICO DELLA CROCE[2], HAN HOOGEVEEN[3], JIPPE HOOGEVEEN[3]

[1] UNIVERSITE DE TOURS, LABORATOIRE D'INFORMATIQUE FONDAMENTALE ET APPLIQUEE
64 Avenue Jean Portalis, 37200 Tours, France
{quentin.schau,olivier.ploton,tkindt}@univ-tours.fr

[2] DIGEP, POLITECNICO DI TORINO
Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino, Italy
federico.dellacroce@polito.it

[3] DEPARTMENT OF INFORMATION AND COMPUTING SCIENCES, UTRECHT UNIVERSITY
Utrecht University Princetonplein 5, 3584 CC Utrecht, Netherlands
j.a.hoogeveen@uu.nl
jippehoogeveen1@gmail.com

Résumé **– L'Industrie 4.0 (I4.0) est une nouvelle forme d'organisation industrielle qui se base sur une digitalisation massive et l'émergence des systèmes cyber-physique (CPS). Nous considérons un système de production composé de plusieurs CPS, qui interagissent entre eux. Cependant, ces CPS agissent individuellement en prenant des décisions dans leur propre intérêt. Nos travaux portant sur l'ordonnancement de la production, considèrent le couplage d'un système centralisé (système de production) et de systèmes décentralisés (CPS), permettant la prise en compte des enjeux de maintenance dans le processus de décision. Pour appréhender de façon pertinente les interactions du couplage maintenance-production, il est nécessaire de les modéliser comme des problèmes d'ordonnancement biniveau. Il s'agit d'une récente classe de problèmes d'ordonnancement extrêmement difficiles à résoudre qui, à notre connaissance, est très peu étudiée dans la littérature. Nous avons établi que le problème d'ordonnancement que nous étudions est NP-difficile. Par ailleurs, nous proposons des méthodes de résolution exacte incluant un algorithme modérément exponentiel, un modèle mathématique et un algorithme de type Branch-and-Bound reposant sur la génération de colonne comme borne inférieure. Des expérimentations numériques montrent l'efficacité en pratique de ces méthodes.**

Abstract **– Industry 4.0 (I4.0) is a new form of industrial organization based on massive digitalization and the emergence of cyber-physical systems (CPS). The manufacturing system is composed of multiple CPS that interact with each other. However, these CPS act individually, making decisions in their own interests. Our work on production scheduling focuses on the coupling of a centralized system (manufacturing system) and decentralized systems (CPS), enables the integration of maintenance issues in the decision-making process. The interactions between coupled maintenance-production, can be modeled as bilevel scheduling problems. To our knowledge, this recent class of scheduling problems are extremely difficult to solve, and the literature is relatively limited. We established that the scheduling problem is NP-hard. Furthermore, we propose exact algorithms using a moderately exponential time complexity algorithm, mathematical models, and branch-and-bound algorithm, as well as a column generation approach used to establish lower bounds for the problem. Numerical experiments demonstrate the practical efficiency of these methods**

Mots clés **- industrie 4.0, ordonnancement biniveau, méthodes exactes**
Keywords **– industry 4.0, bilevel scheduling, exact algorithms.**

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Quantum Annealing To Solve NP-Hard Cut Problems

ALI ABBASSI[1,2], YANN DUJARDIN[2], ERIC GOURDIN[2], PHILIPPE LACOMME [3], CAROLINE PRODHON[1]

[1] ORANGE INNOVATION/DATA-AI/SND/MORE
46 Av. de la République, 92320 Châtillon, France
firstname.name@utt.fr

[2] Computer Science and Digital Society, LIST3N. UTT
12 rue Marie Curie, CS 42060 10004 TROYES CEDEX, France
firstname.name@orange.com

[3] Institut Supérieur d'Informatique, de Modélisation et de leurs Applications, ISIMA
Rue de la Chebarde, 63178 Aubière, France
philippe.lacomme@isima.com

Abstract –
With the increasing complexity of today's telecommunication needs, cybersecurity holds an essential role in modern networks. The Moving Barrier Defense (MBD) framework captures the challenge of ensuring both protection and high-quality service within dynamic network environments. In this work, we study some MBD special cases and reduce them to three NP-hard optimization problems: Restricted Vertex Minimum Multicut (RVMMC)**,** Edge Minimum Multicut (EMMC)**,** and Edge Minimum Multiway Cut (EMMWC)**,** that we approximately solve using D-Wave's quantum annealer. We compare the accuracy and quality of solutions across these formulations and evaluate key bottleneck parameters throughout the workflow, from problem formulation to solution interpretation. Our findings emphasize the critical impact of QUBO formulation**,** physical embedding constraints, and the graph topology on the efficiency and scalability of quantum annealing in solving complex cut problems.
Keywords – Quantum Annealing, Min Multicut , QUBO, D-wave, Moving Barrier Defense

1 INTRODUCTION

Quantum computing was born from the idea of simulating nature, as the universe itself operates under quantum mechanical principles. Early breakthroughs such as Shor's algorithm for integer factorization [Shor, 1994] and Grover's search algorithm [Grover, 1996] demonstrated the potential of quantum algorithms to outperform classical ones in specific computational tasks. At the heart of quantum computing lies the qubit—the quantum counterpart of the classical bit. Unlike bits, which represent binary states (0 or 1), qubits exist in a superposition of both states simultaneously, allowing the encoding of 2^n possible states for n qubits. This property, along with entanglement and quantum tunneling, fuels the promise of quantum algorithms in solving complex problems, particularly in the realm of optimization.

Among the quantum computational paradigms, Quantum Annealing **(**QA**)** has gained prominence for addressing combinatorial optimization challenges. Introduced by Farhi et al. [Farhi, 2000], QA leverages quantum fluctuations to navigate complex energy landscapes, helping escape local minima typical in NP-Hard problems. Unlike gate-based quantum computing, QA employs a time-dependent Hamiltonian to evolve a quantum system from an easily prepared initial ground state to the ground state of a problem-specific Hamiltonian. This process is governed by the adiabatic theorem [Born & Fock, 1928], which asserts that if the evolution is sufficiently slow, the system will remain in its ground state, potentially yielding an optimal solution. The D-Wave quantum computer stands as the reference hardware implementation of QA, solving problems expressed in Quadratic Unconstrained Binary Optimization (QUBO) form or its equivalent Ising model representation. In the QUBO framework, a cost function is minimized: $q(x) = x^T Q x$,where Q is an upper-diagonal matrix encoding the linear biases and couplings between binary variables. The diagonal elements of Q represent external forces applied to qubits, while the off-diagonal elements represent pairwise interactions (couplers). D-Wave has demonstrated notable success in specific domains, particularly when hybrid quantum-classical solvers are employed [Venegas-Andraca et al., 2023]. This study builds on this foundation, exploring how quantum annealing can be applied to an important cybersecurity problem.

.

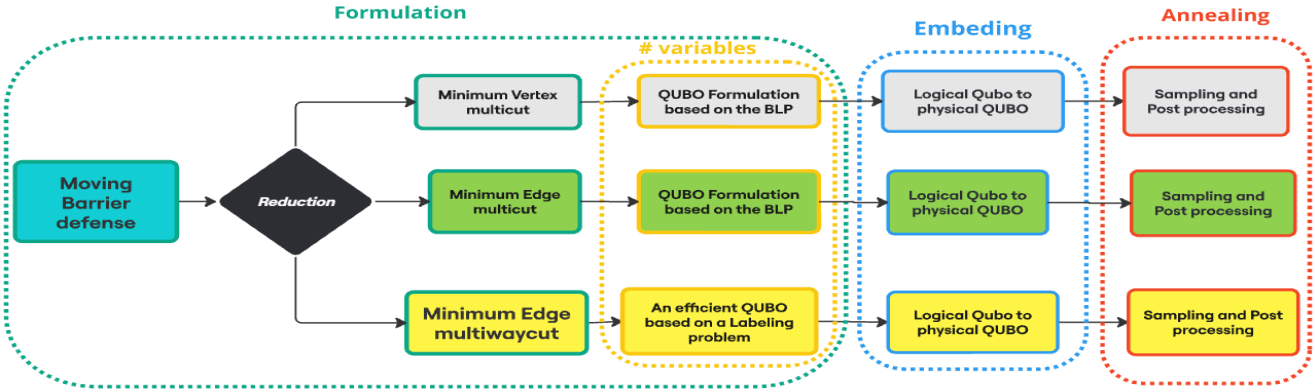


Figure 1. MBD reduction and study workflow

One way of protecting complex telecommunication networks, and keeping high-quality service is to proceed through the *Moving Barrier Defense (MBD* framework. It adjusts dynamically defensive measures in response to evolving cyber threats in the network For instance, MBD can operate by continuously altering *IP configurations***,** *routing protocols***,** and *firewall rules* to complicate adversarial strategies, delay intrusions, and minimize network vulnerabilities. In this study, we reduce *particular instances* of the MBD framework to three NP-hard optimization problems: *Ve*rtex Minimum Multicut [Papadopoulos,2012*] (VMMC*)**,** Edge Minimum Multicut (EMMC)[Costa et al, 2005], and *Minimum Multiway Cut (MMWC)[Heidari et al, 2O22]***,** and solve them using D-Wave's quantum annealer**.** While the reduction from the particular instances of MBD to these cut problems provides a theoretical foundation, our focus lies in evaluating the practical performance of quantum annealing. Specifically, we observe scalability and solution quality across these formulations and assess key bottleneck parameters throughout the quantum workflow comparing Simulated Annealing against Hybrid Quantum-classical annealing.

Our work empirically evaluates quantum annealing for solving NP-hard cut MBD framework. We reformulate Restricted VMMC and EMMC QUBO1 and QUBO2 models and adopt the EMMWC QUBO3 from the literature. These problems are implemented on D-Wave's quantum annealer as shown in figure 1 There are three main stages the formulation, the embedding to D-wave and annealing. We assess computational feasibility and solution quality as . Focusing on practical limitations, we compare quantum annealing (QA), simulated annealing (SA), and hybrid quantum-classical solvers, analyzing optimality gaps, computational time, and embedding constraints. Our results reveal the challenges of minor embedding, chain breaks, and hardware connectivity, showing that QA struggles with large instances, while hybrid solvers achieve better solutions and scale more effectively.

This study provides a detailed assessment of D-Wave's annealing-based approach to combinatorial cut problems, offering insights into when quantum resources outperform classical heuristics and identifying key bottlenecks in quantum optimization workflows. The paper is organized as follows: **Section 2** introduces the Moving Barrier Defense framework and details the optimization problems considered. **Section 3** describes the experimental protocol, focusing on the quantum annealing process, adiabatic and embedding parameters. **Section 4** presents the results and discusses the identified bottlenecks in using D-wave's machine to solve NP-hard cut problems. **Section 5** concludes with insights into potential improvements, the role of hybrid solvers, and directions for future research.

2 Problem Statement

2.1 *Moving barrier defense :* The MBD framework is an extension of the Proactive Countermeasure Selection Problem (PCSP)[Naghmouchi,2019], which systematically allocates countermeasures to fortify the most likely attack paths, optimizing the balance between security effectiveness and cost-efficiency. While PCSP relies on static defenses, MBD introduces a dynamic mechanism for network protection, adapting defensive measures in response to evolving cyber threats. Let $G = (V, E)$ represent the network structure, where V is the set of nodes and E is the set of edges or arcs.

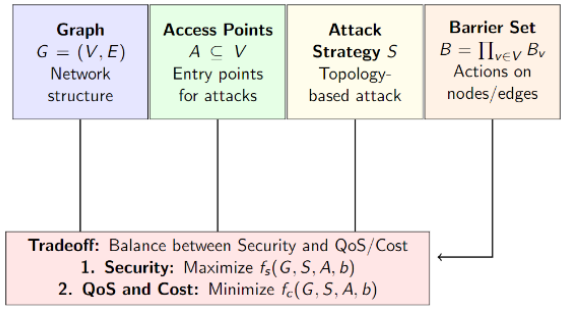


Figure 2. Moving Barrier defense framework

The MBD problem is defined by the following components: *$A \subseteq V$, a set of access points where attacks may be launched.*

S: The attack strategy *employed by adversaries, which could involve* virus propagation**,** blind attacks**,** or path-based incursions *based on the network topology.*

$B = \prod_{v \in V} B_v$: The space of possible defensive actions (barriers) applied to nodes or edges, where B_v denotes the set of barriers at node v.

The optimization objective of MBD is to find the optimal placement and configuration of barriers $b \in B$ to achieve a

balance between two primary criteria: Security Objective: Maximize $f_s(G, S, A, b)$ the security function that quantifies the effectiveness of the barrier configuration in mitigating or preventing attacks. Cost and Service Quality Objective: Minimize $f_c(G, S, A, b)$, the cost function that measures the impact of the defensive configuration on network performance and operational costs, we describe schematically the MBD in figure 2. In our study, we consider f_s as constraint while we minimize f_c i.e. the cost of the counter measures deployment.

Mathematical Formulation and Reduction : We consider a static binary version of the PCSP: MBD Static 0-1. Defined on a undirected risk assessment graph $(G = (V, E), D, I)$, a set of barriers K, with associated unit costs c_k and effects $\gamma_k \in \{0, 1\}$, and a binary propagation difficulty thresholds $D = \{s_w^u \in \{0, 1\} | (u, w) \in U \times W\}$. The task is to strategically place barriers such that critical pairs (u,w) with $s_w^u = 1$ are disconnected from each other by severing all their paths; costs on the access and target nodes are set high enough so we cannot place any barrier on them, $\forall k \in \{(u, w) \in U \times W | s_w^u = 1\}, c_k > \infty$. The MBD Static 0-1 model imposes a binary threshold on risk propagation, where each access node $u_i \in U$ is linked to a specific target node $w_i \in W$. The binary security threshold:

$$s_w^u = \begin{cases} 1 \; If \; (u,w) is \; a \; critical \; pair \\ 0 \; otherwise \end{cases}.$$

In contrast, the PCSP model utilizes a continuous range of propagation difficulty thresholds: where barriers mitigate, but do not necessarily eliminate the risk of propagation. Thereby allowing multiple potential pathways from u_i to various w_i. Furthermore, we place at most one barrier per node :

$$\gamma_k = \begin{cases} 1 \; If \; barrier \; k \; is \; placed \; on \; a \; node, it \; has \; total \; effect. \\ 0 \; no \; barrier \; placed, \quad no \; effect. \end{cases}$$

Input: a undirected risk assessment graph $(G = (V, E), D, I)$a), a set of barriers K, with associated unit costs c_k and effects $\gamma_k \in \{0, 1\}$, an access node set U, a target node set W and a binary propagation difficulty thresholds $D = \{s_w^u \in \{0, 1\} | (u, w) \in U \times W\}$
Question: Find a minimum cost subset $K' \subseteq K$ of barriers such that security constraints and Barrier budget are respected.

Securing a network involves disconnecting critical access and target nodes to prevent attack propagation while minimizing costs. This is formulated as a cut problem, where countermeasures are placed on nodes or edges to sever all paths between terminal pairs. Blocking nodes can represent isolating compromised systems, while cutting edges can simulate firewall rules or disrupted communication links. A network is secure when no viable attack paths remain. This leads to an optimization problem balancing security, which ensures attack prevention, and cost, which minimizes resource expenditure. We model this as three NP-hard problems—restricted vertex minimum multicut, edge minimum multicut, and edge minimum multiway cut—and reformulate them as QUBO models to leverage quantum annealing for efficient solutions.We summarize the notations in the following:

Table1 : Models notations.

Sets and parameters	
V	Set of vertices
H	Pairs of terminals $\{(s_i, t_i)\}, i = \{0, \dots, k\}, k \in N$
T	Terminals$\{(t_i, t_j)\}, i \neq j, i = \{0, \dots, k\}, k \in N$
V_3	Set of vertices that are not terminals.$V_3 = V - H$
E	Set of edges
P_{s_i,t_i}	Set of all paths π_{s_i,t_i} between the pair (s_i, t_i),
W	Weight of edge $e = \{u, v\} \in E \rightarrow w_e = C(\{u, v\})$
M_i, λ, α	Penalty of constraint i, $M_i \in R_+$
Sets and parameters	
x_v	$x_v \in \{0,1\}$, equals 1 if vertex v is cut, o otherwise
x_e	$x_e \in \{0,1\}$, equals 1 if edge e is cut, o otherwise
$x_{u,t}$	Equals 1 if vertex u is assigned to terminal t, o otherwise

2.2 *Minimum Vertex multicut :* The Minimum Vertex Multicut problem addresses the challenge of disconnecting specific terminal pairs in a network by removing the smallest set of vertices. This approach is vital in network security and operational resilience, as it targets critical points for minimizing attack propagation while preserving overall network functionality.
Input: A graph $G = (V, E)$, a set of terminal pairs $H \subseteq V \times V$.
Question: Find a subset C of $V_3 = V \setminus H$ such that it contains no terminal and whose removal separates each pair of vertices H

$$\begin{cases} \min \sum_{v \in V_3} x_v \\ Subject \; to: \\ \sum_{v \in H} x_v = 0 \\ \forall (s_i, t_i) \in H, \forall \pi_{s_i,t_i} \in P_{s_i,t_i} \sum_{v \in \pi_{s_i,t_i}} x_v \geq 1 \end{cases}$$

2.1 Minimum Edge Multicut : The minimum Edge Multicut problem focuses on disconnecting terminal pairs by removing the minimum-weight set of edges. This formulation plays a crucial role in telecommunications and infrastructure resilience, balancing the need for disconnection with cost-efficiency.
***Input**: A graph $G = (V, E)$, a set of terminal pairs $H \subseteq V \times V$, and a weight function: $E \rightarrow R_+$.*
***Question**: Find a minimum-weight subset of edges C $\subseteq$E such that removing C from E disconnects s_i from t_i for every pair $(s_i, t_i) \in H$.*

$$\begin{cases} \min \sum_{e \in E} x_e w_e \\ Subject \; to \\ \forall (s_i, t_i) \in H, \forall \pi_{s_i,t_i} \in P_{s_i,t_i} \sum_{e \in \pi_{s_i,t_i}} x_e \geq 1 \end{cases}$$

2.2 Minimum Multiwaycut: The Minimum Edge Multiway Cut problem extends the multicut approach by req disconnection of all terminals from each other. This is fundamental for tasks such as network segmentation and fault tolerance, where isolated nodes ensure resilience.

Input: A graph $G = (V, E)$, a subset of terminals $T \subseteq V$, and a weight function $w : E \rightarrow R_+$.
Question: Find a minimum-weight subset of edges C ⊆ E that disconnects all terminals $t \in T$ from each other.

$$\begin{cases} \min \sum_{e \in E} x_e w_e \\ Subject\ to \\ \forall (t_i, t_j) \in T, i \neq j, \forall \pi_{t_i,t_j} \in P_{t_i,t_j} \quad \sum_{e \in \pi_{t_i,t_j}} x_e \geq 1 \end{cases}$$

Table 2. Theoretical Results

	Complexity	Famous Algorithms
VMMC	NP-complete, FPT with solution size k, NP-complete in trees with max degree 3-4, [Călinescu et al, 2004]Polynomial in interval graphs[GUO et al 2008]	FPT algorithm $\left(2^{O(\ell^3)} \cdot n^{O(1)}\right)$, DP for interval graphs and RVMM $O(\|V\|^2 \ \|H\|^2)$
EMMC	NP-hard, Polynomial for $k = 1$ (max-flow min-cut), Reducible to single-commodity flow for $k = 2$ [Gard et al 2004]	LP-based approximation $(O(log\ \mathrm{n}))$, Randomized rounding, Low-diameter decomposition
EMMWC	NP-complete for planar graphs (degree 3), APX-hard for $k \geq 3$ [Dahlhaus et al, 1994]	2-approximation algorithm, LP relaxation with shortest paths, Low-diameter decomposition $(O(log\ \mathrm{n}))$

2.3 QUBO Formulations :

A Quadratic Unconstrained Binary Optimization problem is defined over a bitstring $\boldsymbol{x} \in \{0,1\}^n$ *as* :

$$\min_{\boldsymbol{x} \in \{0,1\}^n} f(x) = \boldsymbol{x^T Q x},$$

Where $Q \in R^{n \times n}$is a symmetric matrix. This is equivalent to the Ising Hamiltonian expression by mapping $x_i = \frac{1+x_i}{2}, with\ s_i \in \{-1,1\}$, then

$H(s) = \sum_{i=1}^{n} h_i s_i + \sum_{1 \leq i \leq j \leq n} J_{ij} s_i s_j$;[Mohseni et al 2021]

where $h_i and\ J_{ij}$ are determined by the entries of Q.

QUBO 1 (VMMC) and QUBO 2 (EMMC) are derived from their respective binary linear programs by incorporating constraints into the objective function via penalty terms, following [Glover et al., 2023]. The penalty parameters should be sufficiently large—at least the sum of the weights (if available)—to ensure proper constraint enforcement. When multiple constraints are involved, a preliminary analysis may be necessary to determine appropriate penalty values. This approach introduces overhead due to slack variables for inequality constraints, which can be mitigated by defining an equivalent penalty function H_p[Lucas A,2014]. In contrast, equality constraints can be penalized directly (e.g., via squared differences) to avoid additional overhead. For QUBO 3 (EMMWC)we adopt the specialized formulation of [Heidari et al., 2023], designed for efficient execution on D-Wave's quantum annealer.

$$\mathrm{H}_{1,2} = \mathrm{H}_{\mathrm{obj}_{1,2}} + \mathrm{H}_{\mathrm{p}_{1,2}}$$

$$\mathrm{H}_{\mathrm{p}_1}(\mathrm{x}) = \mathrm{M}_1 \left(\sum_{\mathrm{v} \in \mathrm{H}} \mathrm{x}_\mathrm{v} \right)^2 + \mathrm{M}_2 \sum_{(\mathrm{s_I},\mathrm{t_i}) \in \mathrm{H}} \sum_{\pi_{\mathrm{s_I},\mathrm{t_i}} \in \mathrm{P}_{\mathrm{s_I},\mathrm{t_i}}} \left(\sum_{\mathrm{v} \in \mathrm{P}_{\mathrm{s_I},\mathrm{t_i}}} 1 - \mathrm{x}_\mathrm{v} \right)^2$$

Then we can write H_1as the sum of the objective and penalty terms.

$$H_1(x) = \sum_{v \in V_3} x_v + M_1 \left(\sum_{v \in H} x_v \right)^2 + M_2 \sum_{(s_i,t_i) \in H} \sum_{\pi_{s_i,t_i} \in P_{s_i,t_i}} \left(\sum_{v \in P_{s_i,t_i}} 1 - x_v \right)^2$$

We formulate QUBO2 following the same logic :

$$H_2(x) = \sum_{e \in \mathrm{E}} x_e w_e + \lambda \sum_{(s_i,t_i) \in H} \sum_{\pi_{s_i,t_i} \in P_{s_i,t_i}} \left(\sum_{e \in P_{s_i,t_i}} 1 - x_e \right)^2$$

And finally,

$$H_3(x) = \alpha \left(\sum_{u \in V} \left(1 - \sum_{t \in T} x_{u,t} \right)^2 + \sum_{t \in T} \sum_{t' \in T, t \neq t'} x_{t,t'} \right) + \sum_{\{u,v\} \in E} \sum_{t \in T} \sum_{t' \in T, t \neq t'} c(\{u,v\}) x_{u,t} x_{v,t'}$$

$M_1, M_2, \lambda\ and\ \alpha$ are penalty parameters

Having formulated our problems as QUBO models, we now leverage a Quantum Annealer to find the ground state corresponding to the optimal solution. As illustrated in figure 3, this process follows an adiabatic transition, where the system evolves from an easily prepared initial Hamiltonian H_I to the problem-specific final Hamiltonian H_{Ising}, whose ground state encodes the optimal solution. The measurement step then extracts the lowest-energy state through multiple samples, ensuring robustness in the obtained results.[D-wave 2023]
However, due to embedding constraints and qubit connectivity limitations, solving large QUBO instances directly on the quantum processing unit remains challenging. To address these issues, we employ D-Wave's Hybrid Solver[D-wave Hybrid workflow, 2O24] Racing with Tabu Search, which dynamically balances quantum and classical resources. Unlike rolling hybrid solvers, this method allows multiple solver instances to compete, prioritizing those with faster convergence. The workflow begins with problem decomposition, where the solver partitions the QUBO into smaller subproblems. The quantum processing unit handles portions where quantum tunneling can efficiently explore the solution space, while the Tabu Search algorithm refines solutions on the classical side to help escape local minima. Dynamic resource allocation ensures computational efficiency by directing problems with high connectivity constraints to classical solvers while leveraging quantum sampling where beneficial. Once partial solutions are obtained, the solver iteratively refines them through repeated interactions between quantum and classical components, improving feasibility and solution quality.

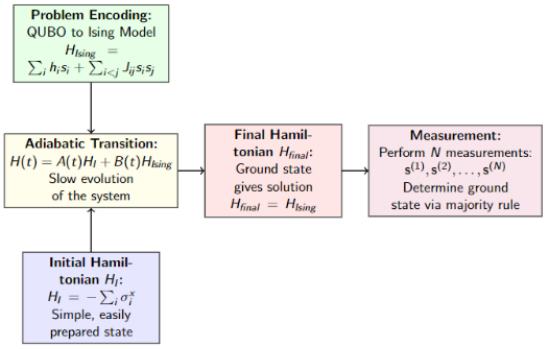


Figure 3. Quantum Annealing Workflow

3 EXPERIMENTAL PROTOCOL

We conduct our experimental study on tree-structured graphs**,** where each pair of terminals has exactly one unique path. This ensures a controlled environment for evaluating QUBO formulations while maintaining the inherent challenges of embedding constraints on D-Wave's quantum hardware, such as limited qubit connectivity and chain-strength tuning [Venegas-Andraca et al., 2019]. Our objective is to assess the scalability and feasibility of three distinct QUBO formulations—Vertex Minimum Multicut (QUBO 1), Edge Minimum Multicut (QUBO 2), and Edge Minimum Multiway Cut (QUBO 3)—under quantum annealing, comparing their performance against classical and hybrid solvers**.**

3.1 *Instance Generation:* We generate random tree graphs for each QUBO formulation, ensuring that source-sink pairs are well distributed and that the graph structures remain feasible. For QUBO1, an unweighted tree graph is constructed with n vertices and m randomly selected non-adjacent source-sink pairs, maintaining path uniqueness. A random spanning tree is generated using $NetworkX\ python$, with pairs selected iteratively while preserving feasibility constraints. In QUBO2 we extend this by introducing random edge weights uniformly sampled from [1,100] following the same non-adjacent source-sink selection process to maintain graph connectivity. Lastly, for QUBO3 we define a set of terminal nodes that must be disconnected via edge removal**.** These terminals are positioned to avoid trivial disconnections**,** ensuring they are separated by at least two edges, and the edge weights are sampled from [1,100] to maintain numerical stability**.**

3.2 *QUBO Formulation and Parameter Tuning:* To ensure feasibility, we perform a sensitivity analysis on QUBO1 penalty parameters M_1 and M_2, using Grid Search[Cite] by Systematically varying M_1 and M_2, to examine ground-state energy behavior and identify optimal ranges**.** Monte Carlo Sampling: Randomly sampling penalty values to estimate expected energy levels and feasibility probability**.** This tuning step ensures penalties are neither too weak (leading to constraint violations) nor excessively strong (causing numerical instability)**.** It was conducted using simulated annealing to solve the QUBOs rapidly. As for QUBO2 and QUBO1, the parameters where set to the sum of the weights. *D-Wave's architecture introduces several bottlenecks:*

*Qubit Connectivity and Couplers***:** Due to the limited connectivity in D-Wave's Chimera and Pegasus topologies, logical variables often require qubit chains—multiple physical qubits linked together via couplers. The strength of these couplers directly affects chain stability, where weak couplings can lead to chain breaks, resulting in inconsistent or suboptimal solutions *[Bertuzzi et al., 2024]*. *Physical Embedding Constraints***:** Mapping complex problems onto the D-Wave architecture necessitates embedding algorithms, which can significantly inflate the number of required qubits and reduce computational efficiency *[Cruz-Santos et al., 2019]*. *Analog Noise and Precision***:** The analog nature of D-Wave's quantum processors introduces *thermal noise* and *precision limitations* in setting coupler strengths and biases, further complicating the optimization process

3.3 *Solving and Performance Evaluation:* Each QUBO is solved using D-Wave's quantum annealer**,** alongside classical simulated annealing(metaheuristic)[c, exact MILP solvers (HiGHS), and hybrid quantum-classical methods[cite, D-wave]**.** Solution quality is assessed using the optimality gap**,** defined as:

$$Optimality\ Gap = \frac{Cost_{compute\ d} - Cost_{exact}}{Cost_{exact}} \times 100\%$$

$Cost_{exact}$ is computed using and exact MILP solver (HiGHS) The optimality gap is displayed in the results section whenever a solution is not optimal, otherwise we either cannot compute it because of the size of the problem or the solution is optimal.

Additionally, we measure the sampling time, Embedding difficulty **(e.g.,** chain length, number of broken chains and connectivity constraints**)** and Solution feasibility (whether all constraints are satisfied)

Table 3. Theoretical Results

	Description	Details
QUBO formulation	How each problem is modeled	QUBO 1 and QUBO 2 via penalty constraints; QUBO 3 uses a specialized formulation
Instance Generation	Process of generating test cases	Random spanning trees; Source-sink pairs selected to avoid trivial adjacency; Weighted edges sampled from [1,100] in QUBO 2 and 3
Penalty Tuning	Method to optimize penalty parameters	Grid search and Monte Carlo sampling to balance feasibility and numerical stability usin simulated Annealing.
Solver Used	Algorithms applied to solve QUBOs	D-Wave Quantum Annealer, Simulated Annealing , D-wave's Hybrid Quantum-Classical Solver, MILP (HiGHS),
Performance Metrics	Criteria for evaluation	(Terminal,Instance)size Optimality Gap, Computational Time, Embedding Difficulty, Solution Feasibility

3.4 *D-wave's parameters:* For our experiments, we used D-Wave Advantage System 5.4 (eu-central-1) with 5,614 functional qubit**s** under the *Pegasus topology***,** enabling improved qubit connectivity for efficient embeddings. The *MinorMiner (MM) algorithm* was used for embedding, minimizing chain lengths to enhance stability. The annealing schedule was set to a *default annealing time of* 20μs within the system's *[0.5, 2000] μs* range, with an

*extended coupling strength (J-range) of [-2,1]***.** For larger problem instances, we employed the *Leap Hybrid Solver*, which dynamically integrates quantum annealing with classical heuristics to balance computational efficiency. We select the racing method instead of rolling due to its worklow described in the previous section.

4 RESULTS INTERPRETATION :

4.1 QUBO1 Analysis

Table 4. QUBO1 Solutions

Instance	QA		SA		Hybrid	
(|H|,|V|)	(-)Cost	CS	(-)Cost	CS	(-)Cost	Cost
(2,12)	396	2	396	2	789	2
(3,12)	594	3	594	3	1368	3
(3,24)	1583	3*(50%)*	1584	2	4433	2
(10,70)	1.e+05	14(180%)	1.773e+04	5	1.599e+05	5
(10,100)	5.e+04	23(360%)	1.010e+04	5	9.329e+04	5
(20,100)	2.e+08	49(277%)	1.973e+07	13	3.591e+08	13

The cost represents the system's energy, and even a small variation, such as between -1583 and -1584, can lead to a 50% drop in optimality.The cutset size corresponds to the number of removed vertices, and in the instance with three terminal pairs and 24 vertices, this optimality gap is due to a chain break. This occurs because the physical qubits needed for embedding must align with the QPU's connectivity constraints. Re-embedding with a shorter or better-connected chain improves the solution, confirming that chain length significantly impacts accuracy, even in small instances.

Although the hybrid solver consistently achieves lower energy costs than simulated or quantum annealing, this does not always translate into an optimal cut size. For example, in instances with 10 terminals and 70 or 100 vertices, the embedded QUBO has a much lower energy cost, yet the cut size remains over 333% larger than the optimal solution. This suggests inefficiencies in the embedding, likely due to long chains. Reducing chain lengths or improving qubit allocation is necessary to correct this issue. As complexity increases, feasibility becomes a growing concern. In the instance (20,100), the solution not only deviates from optimality but also violates the first constraint, which prohibits terminals in the cutset. This is likely due to an imbalance in penalized constraints, with similar violations observed across other instances. Across all cases, the hybrid solver and simulated annealing maintain an average optimality gap of 25% compared to the exact solver. However, it is important to note that the exact solver benefits from the structural properties of the graph, which inherently favor its approach. These findings underscore the importance of fine-tuning chain strength, optimizing QUBO formulations, and refining embeddings to improve both feasibility and solution quality.

Table 5. QUBO1 computational time

Instance	QA (s)	SA(s)	Hybrid(s)
(2,12)	0.1456	0.0357	11.29
(3,12)	0.1326	0.0184	10.88
(3,24)	0.2800	0.0659	10.96
(10,70)	7.631	0.170	17.721
(10,100)	9.309	0.192	17.085
(20,100)	25.447	0.220	43.775

The computational time analysis highlights key differences in the scalability of quantum annealing (QA), simulated annealing (SA), and the hybrid solver. SA consistently achieves the fastest execution, maintaining times between 0.0357s and 0.220s, even as problem size increases. This suggests a nearly constant time complexity relative to the problem instances considered. The hybrid solver, while achieving lower energy, exhibits significantly longer runtimes, starting at 11.29s for (2,12) and increasing to 43.775s for (20,100). However, its scaling behavior appears more stable, with execution time growing more predictably as the problem size increases. QA falls between these two methods but does not demonstrate the same stability in time complexity. Overall, SA remains the most efficient for rapid computations, while the hybrid solver, despite its higher initial cost, scales more predictably. However, its time remains significantly larger

4.2 QUBO2 Analysis

Table 6. QUBO2 Solution

Instance	QA		SA		Hybrid	
(|H|,|V|)	CS	CC	CS	CC	CS	CC
(2,12)	2	37	2	37	2	37
(2,24)	2	40	2	40	2	40
(50,150)	95	4626	37	1540	37	1540
(60,200)	123	5803	49	2312	49	2312
(100,300)	188	9904	53	2628	53	2628
(100,450)	NaN	NaN	75	3918	75	3918

Table 7. QUBO2 Embeddidng

Instance	Var	Qubits	Interaction	Aveg Degree	Sampling time
(2,12)	11	15	30	5.45	0.14
(2,24)	23	26	22	1.91	0.16
(50,150)	149	843	2161	29.01	156.51
(60,200)	199	1679	3314	33.31	234.51
(100,300)	199	1461	3314	33.31	174.80
(100,450)	299	3301	5048	33.77	103.69

For this QUBO formulation, all solutions found were feasible, with no violations of constraints. Hybrid solvers performed identically to simulated annealing (SA) in terms of cutset size and cut cost, suggesting that quantum resources did not provide an advantage over classical methods for this problem. In contrast, quantum annealing (QA) produced larger cutsets (e.g., 95 vs. 37 in (50,150) and 123 vs. 49 in (60,200)), likely due to embedding inefficiencies and chain breaks. Minor embedding, handled by MinorMiner, remained effective for small instances but failed for (100,450), where high interaction density (5048 edges) exceeded the connectivity limitations of the quantum hardware. Sampling time scaled non-linearly, increasing from 0.14s (2,12) to 234.51s (60,200), reflecting the impact of longer chains and higher qubit usage. The average node degree doubled from small to large instances (5.45 to 33.77), reinforcing how coupler limitations and external field constraints restrict scalability. Overall, QA struggled with large instances due to embedding failures, while hybrid and SA remained robust but indistinguishable in performance, questioning the advantage of hybrid solvers for this formulation. Exact solver solved up to the third instance for which we had an average of 44% optimality gap, then reached its computational limit for instance $V| \geq 200$

4.3 QUBO.*QUBO3 Analysis*

Table 8. QUBO3 computational time

Instance	QA	SA	Hybrid	Exact
(2,12)	1	1	1	1
(2,24)	6	9	2(50%)	1
(4,24)	34	42	6(20%)	5
(10,70)	561	304	44	NaN
(60,200)	NaN	1049	498	NaN

Table 9. QUBO3 computational time

Instance	QA (s)	SA(s)	Hybrid(s)	Exact(s)
(2,12)	0.085	0.192	17.707	0.117
(2,24)	0.147	0.362	10.772	0.121
(4,24)	0.631	0.851	10.021	0.124
(10,70)	101.371	8.596	11.261	NaN
(60,200)	NaN	697.400	255.192	NaN

The results indicate a clear performance advantage of the hybrid solver over both quantum annealing (QA) and simulated annealing (SA) for solving QUBO3. Quantum annealing scales poorly due to embedding failures, making it infeasible for larger instances, while the hybrid solver remains robust across all cases.For smaller instances, QA initially benefits from faster execution times, achieving 0.085s vs. 0.192s for SA in (2,12) and 0.147s vs. 0.362s for SA in (2,24). However, beyond (4,24), QA's advantage diminishes, becoming the slowest and least precise approach for larger graphs. For instance, in (10,70), QA takes 101.37s compared to just 8.60s for SA, and for more complex cases, QA fails to find an embedding at all.The hybrid solver, while significantly slower for small graphs, scales much better. Unlike QA, it does not face embedding issues and consistently produces better solutions. The optimality gap for the hybrid solver is lower than SA's across all instances, with examples like (10,70) where hybrid achieves a cut cost of 44 vs. 304 for SA. This trend holds across larger graphs, demonstrating the hybrid solver's superior optimization quality.While QA offers a computational speed advantage for small graphs, this disappears for larger instances. The hybrid solver, despite its high runtime, consistently outperforms both classical heuristics and quantum annealing in cut cost, making it the most effective approach for solving large-scale QUBO3 problems. Exact solver failed to scale due to complexity and probably solver's limit.

5 Conclusion

This study assessed the feasibility of solving NP-hard cut problems using D-Wave's quantum annealer, comparing quantum annealing (QA), simulated annealing (SA), and hybrid quantum-classical solvers. Our results highlighted key bottlenecks in the quantum workflow, particularly chain breaks, embedding constraints, and scalability issues.

Chain breaks were observed across both small and large instances, degrading solution quality and increasing variability. This issue stems from qubit connectivity limitations, where logical qubits must be mapped onto multiple physical qubits, making the problem susceptible to errors. Embedding difficulties further exacerbated this challenge, particularly for large instances where high interaction density led to failed embeddings, rendering QA ineffective beyond a certain problem size. Scalability was influenced not only by the number of vertices but also by the number of terminal pairs, which significantly impacted solution complexity. QA struggled to handle this growth due to embedding failures, while hybrid solvers remained robust, producing more accurate solutions even as problem sizes increased. Since this study focused on a specific QUBO formulation for two problems Restricted Vertex Minimum Multicut (RVMMC) and Edge Minimum Multicut (EMMC), alternative formulations in a near future will aim at improved performance .Future work will also explore different graph structures to assess whether quantum solvers can eventually surpass classical methods in terms of instance size limits: investigating better embedding strategies and optimized penalty tuning for QUBO formulations could also enhance solution quality and reduce computational overhead.

Overall, while hybrid solvers show promise in overcoming some of QA's limitations, fundamental embedding constraints and hardware bottlenecks remain major obstacles. Further research is needed to refine problem formulations and optimize quantum resources to determine the true advantage of quantum computing in combinatorial optimization

6 References

Bertuzzi, A., Ferrari, D., Manzalini, A., & Amoretti, M. (2023). Evaluation of quantum and hybrid solvers for combinatorial optimization. Quantum Software Laboratory, University of Parma, Telecom Italia.

Călinescu, G., Fernandes, C. G., & Reed, B. A. (2003). Multicuts in unweighted graphs and digraphs with bounded degree and bounded tree-width. Journal of Algorithms, 48(2), 333–359.

Costa, M.-C., Létocart, L., & Roupin, F. (2005). Minimal multicut and maximal integer multiflow: A survey. European Journal of Operational Research, 162(1), 55–69.

Dahlhaus, E., Johnson, D. S., Papadimitriou, C. H., Seymour, P. D., & Yannakakis, M. (1994). The complexity of multiterminal cuts. SIAM Journal on Computing, 23(4), 864–894.

Farhi, E., Goldstone, J., Gutmann, S., & Sipser, M. (2000). Quantum computation by adiabatic evolution. arXiv preprint arXiv:0001106.

Garg, N., Vazirani, V. V., & Yannakakis, M. (2004). Multiway cuts in node-weighted graphs. Journal of Algorithms, 50(1), 49–61.

Glover, F., Kochenberger, G., & Du, Y. (2019). A tutorial on formulating and using QUBO models. arXiv preprint arXiv:1811.11538.

Guo, J., Hüffner, F., Kenar, E., Niedermeier, R., & Uhlmann, J. (2008). Complexity and exact algorithms for vertex multicut in interval and bounded treewidth graphs. European Journal of Operational Research, 186(2), 542–553.

Heidari, S., Dinneen, M. J., & Delmas, P. (2022). An equivalent QUBO model to the minimum multi-way cut problem. Technical Report CDMTCS-565, CDMTCS Research Reports.

D-Wave Systems Inc. (2023). D-Wave documentation web page. Retrieved from https://docs.dwavesys.com/docs/latest/index.html

D-Wave Systems Inc. (2024). Hybrid workflow solvers. Retrieved from https://docs.ocean.dwavesys.com/en/stable/docs-hybrid/intro/overview.html

Lucas, A. (2014). Ising formulations of many NP problems. arXiv preprint arXiv:1302.5843.

Mohseni, N., McMahon, P. L., & Byrnes, T. (2021). Ising machines: Hardware solvers for combinatorial optimization problems. State Key Laboratory of Precision Spectroscopy.

Naghmouchi, M. Y. (2019). Security management in telecommunication systems: Models, polyhedra, and algorithms. (PhD thesis, Université Paris Sciences et Lettres).

Papadopoulos, C. (2012). Restricted vertex multicut on permutation graphs. Discrete Applied Mathematics, 160(12), 1791–1797.

De Santis, D., Tirone, S., Marmi, S., & Giovannetti, V. (2024). Optimized QUBO formulation methods for quantum computing. arXiv preprint arXiv:2406.07681.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Order Acceptance Scheduling considering Energy Aspects

IMANE BOUKERROUIS[1], ALICE YALAOUI[1], H. MURAT AFSAR[1]

[1] University of Technology of Troyes
12 Rue Marie Curie, 10300 Troyes, France
{imane.boukerrouis, alice.yalaoui, murat.afsar}@utt.fr

Résumé

Les récents changements économiques et sociétaux ont entraîné une augmentation substantielle de la consommation d'énergie, en particulier dans le secteur manufacturier à forte intensité énergétique. Face à l'augmentation des coûts de l'énergie et aux réglementations gouvernementales plus strictes, de nombreuses entreprises ont adopté des stratégies visant à optimiser leur consommation d'énergie. Parmi ces stratégies, l'amélioration de l'efficacité énergétique et l'optimisation de l'ordonnancement des tâches sur la base de politiques de prix dynamiques revêtent une importance particulière. Dans ce contexte, notre travail vise à étudier l'optimisation de l'ordonnancement des tâches, en considérant à la fois l'acceptation et le rejet des tâches, tout en intégrant les aspects énergétiques essentiels. En particulier, notre étude se concentre sur la résolution de problèmes d'ordonnancement en fonction de prix dynamiques de l'énergie (TOU, RTP), ainsi que de contraintes de consommation d'énergie, qu'elles soient périodiques, basées sur des intervalles, à fenêtre glissante ou globales. L'objectif principal est de fournir un examen exhaustif des propriétés des différentes variantes de ce problème, ainsi que de développer et d'analyser des méthodes d'optimisation appropriées pour améliorer la gestion de l'énergie dans les processus de production tout en réduisant les coûts énergétiques.

Abstract

Recent economic and societal changes have resulted in a substantial increase in energy consumption, particularly within the energy-intensive manufacturing sector. In light of rising energy costs and stricter government regulations, many companies have adopted strategies aimed at optimizing their energy consumption. Among these strategies, improving energy efficiency and optimizing task scheduling based on dynamic pricing policies are of particular importance. In this context, our work aims to study the optimization of task scheduling, considering both task acceptance and rejection, while integrating essential energy aspects. In particular, our study focuses on solving scheduling problems under dynamic energy prices (TOU, RTP), as well as energy consumption constraints, whether they are periodic, interval-based, sliding window, or global. The primary objective is to provide a complete study to investigate the properties of different variants of this problem, and to develop and analyze appropriate optimization methods to improve energy management in production processes while reducing energy costs.

Mots clés **- Ordonnancement avec acceptation, Énergie, Time-Of-Use.**
Keywords **– Order Acceptance Scheduling, Energy, Time-Of-Use.**

CIGI QUALITA MOSIM 2025
A Simulation-Based Approach to Analyzing Railway Capacity: Ethiopia's Railway Line

NADIA JAOUI[1], TARIK AOUAM[12], NIZAR EL HACHEMI[13]

[1] SOLA, ABS, MOHAMMED VI POLYTECHNIC UNIVERSITY
RABAT, 11103, MOROCCO
nadia.jaoui@um6p.ma

[2] FACULTY OF ECONOMICS AND BUSINESS ADMINISTRATION
GHENT, 9000, BELGIUM
tarik.aouam@um6p.ma

[3] MOHAMMADIA SCHOOL OF ENGINEERS, MOHAMMED V UNIVERSITY
RABAT, 10090, MOROCCO
nizar.elhachemi@um6p.ma

***Résumé* – Ce travail consiste à étudier la capacité de la ligne ferroviaire reliant le port polyvalent de Doraleh à Djibouti et le site de production de Dire Dawa en Éthiopie. Pour ce faire, nous avons développé un modèle de simulation à événements discrets à l'aide de l'outil Arena. Ce modèle a pour objectif d'analyser les faiblesses de la voie ferrée, d'estimer sa capacité actuelle, et de proposer des pistes d'amélioration afin d'optimiser son exploitation. Les résultats des tests ont été obtenus en s'appuyant sur un ensemble d'hypothèses, de contraintes physiques et réglementaires, tout en intégrant diverses sources d'incertitude afin de renforcer le réalisme du modèle. Par la suite, nous avons analysé l'impact de ces incertitudes sur des indicateurs de performance jugés pertinents pour notre étude. Enfin, sur la base de cette analyse, nous proposons des solutions visant à augmenter la capacité de la ligne, soit en optimisant le nombre de trains circulant sur celle-ci, soit en ajoutant des voies d'évitement entre les stations les plus éloignées, compte tenu du fait que la ligne est à voie unique.**

***Abstract* – This work examines the capacity of the railway line connecting the Doraleh multipurpose port in Djibouti and the production site in Dire Dawa in Ethiopia. To study this line, we developed a discrete event simulation model using the Arena software. The model aims to analyze the weaknesses of the railway line, estimate its current capacity, and propose improvement strategies to optimize its performance. The test results were generated based on a set of assumptions and physical and operational constraints while incorporating various uncertainty sources to enhance the model's realism. Subsequently, we analyzed the impact of these uncertainties on performance indicators deemed relevant to our study. Finally, based on this analysis, we propose solutions to increase the capacity of the railway line, either by optimizing the number of trains operating on it or by adding passing loops and tracks between the most distant stations, given that the line is single-track.**

***Mots clés* – Fret ferroviaire, estimation de la capacité ferroviaire, amélioration de la capacité ferroviaire, modèle de simulation.**

***Keywords* – Rail freight, railway capacity estimation, rail capacity enhancement, simulation model.**

1 INTRODUCTION

Transportation within supply chains offers several alternatives, yet rail transport remains a preferred option for many businesses. Railways are known not only for their capacity to transport large amounts of goods and passengers along fixed routes but also for being an environmentally friendly and economical alternative to road transport. Railway networks are increasingly becoming the preferred choice due to their environmental and operational advantages.

This study is motivated by a collaborative project with an industry partner, the OCP (Office Cherifien des Phosphates), a leading African producer and exporter of mineral fertilizers. The company is expanding its reach by establishing a production site near regions where most of its customers are located. To support its production process, the company must transport vast quantities of raw materials along a single-track railway line between Doraleh Multipurpose Port (DMP) in Djibouti and the production site in Dire Dawa, Ethiopia. This operational context presents capacity challenges. This is the

reason that prompts us to investigate the current limits of railway utilization and potential enhancements.

To do so, we develop a simulation model that captures the specifications and dynamics of the railway line under study. Such a technique is relevant to this context for many reasons. First, mathematical modeling is challenging due to the interplay between trains, infrastructure, and uncertainty. Second, mathematical equations cannot adequately represent the operational constraints regarding timetables, priority rules, stops at stations, track capacity, and conflict constraints. Third, it is crucial to incorporate unforeseen disruptions such as delays, technical problems, and failures while studying railway networks. Unlike optimization-based mathematical models that produce optimal solutions based on approximated models, simulation allows for the testing of numerous real scenarios to examine the system's performance under such unexpected events.

Simulation techniques have become crucial in analyzing railway networks. They allow researchers to build detailed models that capture the dynamic interactions between different types of trains (freight and passenger) and to understand how these interactions affect the network performance. One of the primary applications of simulation in railway research is capacity analysis. [D'Acierno et al., 2019] introduced the concept of "simulated capacity" as an intermediate measure between theoretical and practical rail capacity. The simulated capacity refers to the maximum number of trains that can operate on a rail network under realistic constraints. Similarly, [Lindfeldt, 2015] and [Espinosa-Aranda and García-Ródenas, 2012] emphasized the role of simulation in assessing network resilience under congestion patterns and critical bottlenecks in railway networks. Simulation is also used to evaluate operational impacts and optimize the scheduling of trains. [Singhania and Marinov, 2017] analyzed the effects of introducing additional freight trains on scheduled passenger timetables, which revealed potential conflicts and capacity constraints. [Marinov and Viegas, 2011] developed a mesoscopic simulation model using SIMUL 8 to represent freight train operations as queuing systems, thereby capturing the broader operational impact on the network. More recently, [Högdahl and Bohlin, 2023] examined timetable robustness and the feasibility of new services, such as baggage transfers, using simulation to test various scheduling scenarios.

To address the complexity of railway operations, researchers have explored combined simulation approaches. [Hu et al., 2022] addressed a multi-objective planning challenge in urban rail transit by combining discrete event and agent-based simulations using the AnyLogic software. Their model captures the dynamic exchanges among stations, trains, and passengers, which allows for enhanced scheduling decisions under complex conditions. Other studies, such as [Middelkoop and Bouwman, 2001] and [Woroniuk and Marinov, 2013], have focused on conflict detection and critical point identification along railway routes thus highlighting the effectiveness of simulation in dealing with operational disruptions. For more details, we refer the reader to the reviews and case studies by [Yeung and Marinov, 2017], [Mikulˇci´c and Mlinari´c, 2021], and [Tischer et al., 2020]. [Yeung and Marinov, 2017] and [Mikulčić and Mlinarić, 2021] reviewed the capabilities of various simulation software in railway planning and operations while [Tischer et al., 2020] examined modern signaling systems and their impact on railway simulations.

Building on these insights, our work focuses on quantifying the simulated capacity under a set of operational constraints. To this end, we develop a discrete event simulation (DES) model using Arena software, a platform recognized for its effectiveness in rail freight studies. The model is employed to not only reflect the operational realities of this specific network but also create a framework for scenario analysis. This enables us to investigate how factors such as delays, network conflicts, failures of used resources, and passenger train scheduling influence capacity and to propose strategic solutions to enhance the capacity of the railway line to support the company's broader operational objectives.

The rest of the paper is organized as follows. Section 2 describes the railway line investigated, the issues at hand, and the objectives. Section 3 presents the developed simulation model and its characteristics. Section 4 covers results analysis and recommendations. Finally, in Section 5 conclusions are drawn.

2 STUDIED RAILWAY LINE

This study focuses on the modeling of the railway line that connects DMP in Djibouti to the industrial plant in Dire Dawa, Ethiopia. In (Figure 1), the red frame highlights the boundaries of the railway line in question.

Figure 1. Scope of the study (Source: Wikipedia).

The railway line connecting DMP and the industrial plant in Dire Dawa is described using (Figure 2).

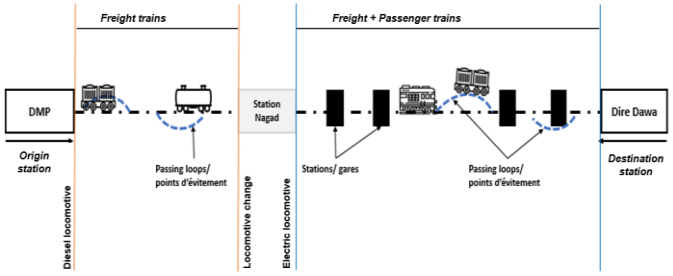


Figure 2. Description of the railway line

As shown in (Figure 2), the line is divided into two segments. The first segment runs from DMP to the Nagad station in Djibouti. This segment is not electrified, and therefore the trains are pulled by diesel locomotives. The second segment connects the Nagad station to the station near the production site in Dire Dawa. Throughout this segment, the railway route is powered by overhead lines, so the trains are pulled by electric locomotives. The line in question consists of a set of stations where certain operations take place and passing loops and tracks to facilitate the movement of trains are established. Among these operations, we mention loading at DMP, changing locomotives from diesel to electric or vice versa depending on the direction of trains and unloading at the production site.

It is essential to mention that each station has two tracks, one designated for outbound trains, denoted 'T1', and the other for inbound trains, denoted 'T2'. We have also assumed that at the port there is a single loading line with specific resources and at the production site there are two unloading lines, each with its own resources.

The railway line operates under several constraints and complexities that affect its capacity. The line consists of a single-track configuration; therefore, to avoid conflicts, train movements should be carefully coordinated considering priority rules. Moreover, one should adhere to the passenger train timetables, which limit the flexibility of freight trains. In addition, there is increasing competition for the signed-track line availability because other freight trains use the line alongside the OCP freight trains. Furthermore, across the studied railway line, many uncertainty sources, such as resource breakdowns and train delays, should be considered since they can disrupt various operations and reduce the line capacity.

The problem addressed in this study can be expressed by the following two questions.

1. What is the current capacity of the railway line connecting DMP and the production plant in Dire Dawa?
2. How can we improve the performance of this line to support the OCP's business?

3 Simulation Model

3.1 Operational constraints and rules

To ensure the proper functioning of the system, certain operational constraints and rules are considered.

- **a. Conflict constraints**: two trains cannot operate in opposite directions between two stations, two passing tracks, or between a station and a passing track.
- **b. Security constraints:** a safety distance must be maintained and respected throughout the journey between the departure of two consecutive trains.
- **c. Priority rules:** passenger trains have always the priority.

3.2 DES model components and workflow logic

Different components of the railway line are modeled using a DES model. Among these components, we mention stations, passing tracks, tracks between stations, and resources used to perform loading, unloading, and changing locomotivenecessa operations. (Figure 3) provides an overview of the represented components.

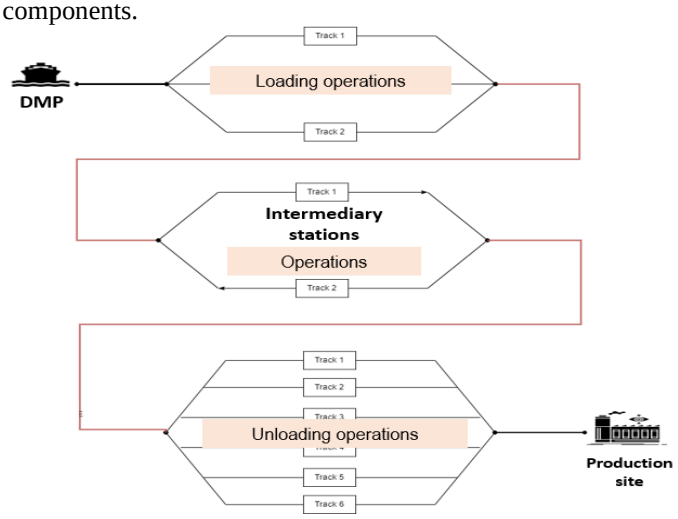


Figure 3. Overview of the conceptual diagram of the railway line.

The logic used to model train movements along the railway line is summarized in the diagram in (Figure 4). The process begins with the creation of a train at the origin station: freight trains at DMP and passenger trains at Nagad. Based on predefined constraints and conditions, a decision is made on whether the train should proceed to the next station or remain at its current station until the conditions are met. Upon arrival at a station, necessary operations such as loading, unloading, or locomotive changes are performed. Once the train reaches its final destination, required operations take place when the resources are available. The train then returns to the previous station by following the same process.

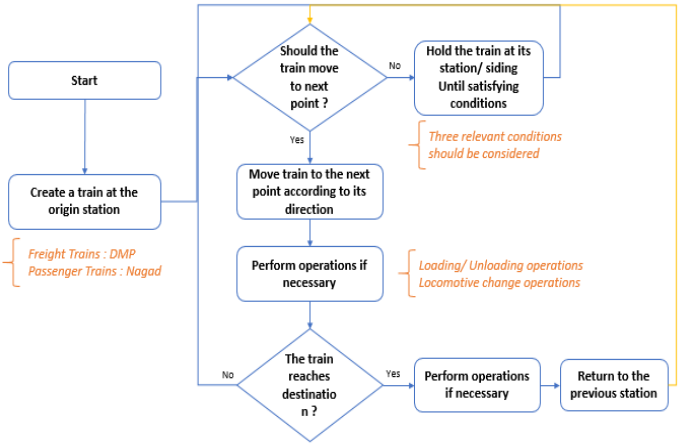


Figure 4. Simulation model workflow.

3.1 DES model implementation

The railway is modeled using a combination of modules: create, process, decide, and dispose as depicted in (Figure 5).

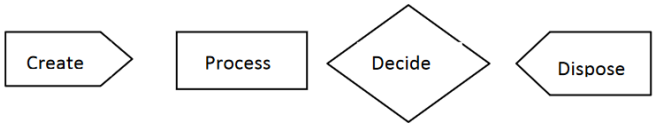


Figure 5. Modules used in our DES model.

The following figures present an overview of the simulation model developed using Arena tool. They show the relevant processes across the railway line.

- Initialization

In this step, we defined the entities that will operate on the railway line, including passenger trains following fixed schedules, diesel and electric locomotives, as well as freight trains composed of freight cars and tank cars.

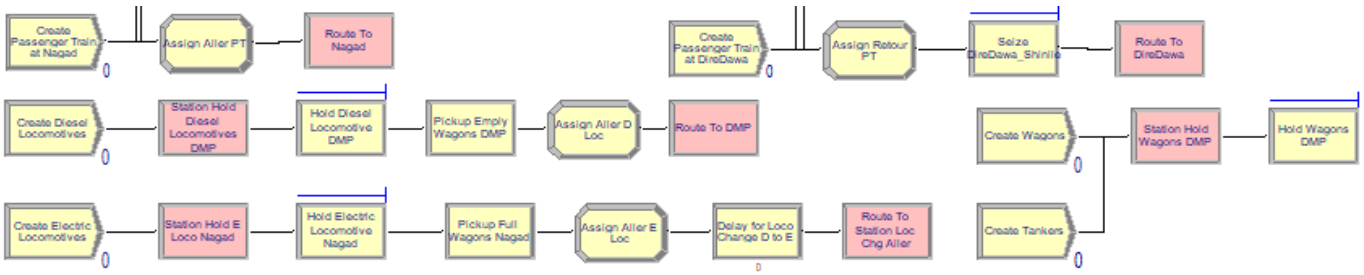


Figure 6. Initialization.

- Operations at DMP

At DMP, we assume the presence of three tracks for accommodating trains, with one track designated for loading operations.

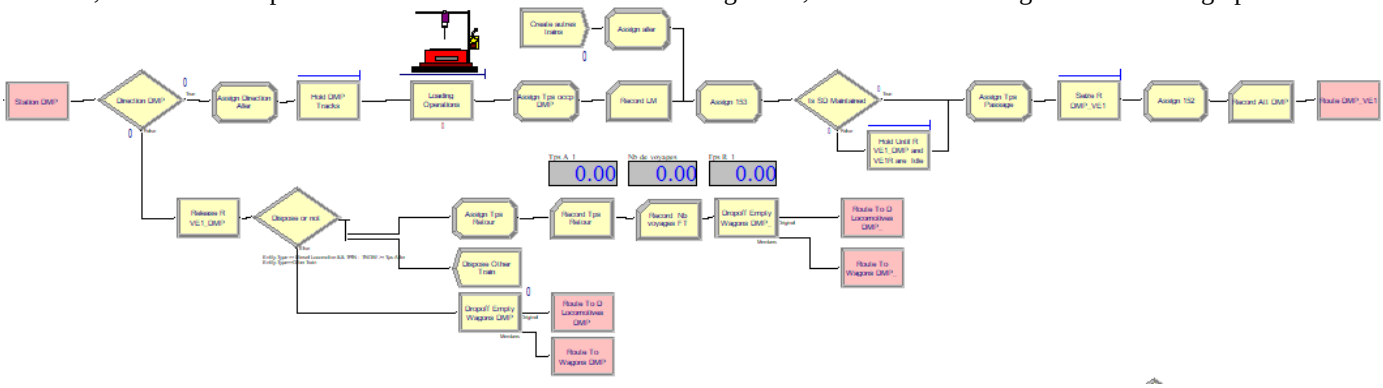


Figure 7. Operations at DMP.

- Operations at Nagad

The locomotive change between diesel and electric occurs at Nagad station, where passenger trains also start their journeys.

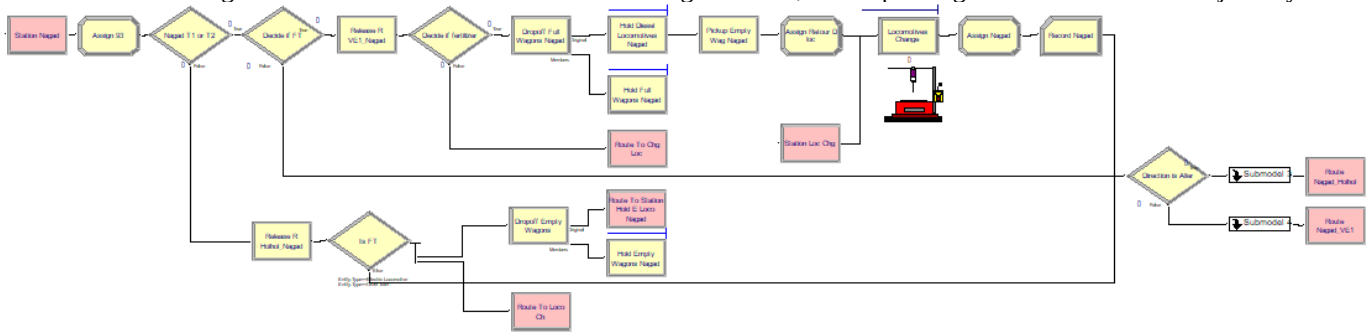


Figure 8. Operations at Nagad.

- Operations at the production site

At the production site, we assume that two of the six available tracks are dedicated to unloading operations, utilizing various resources.

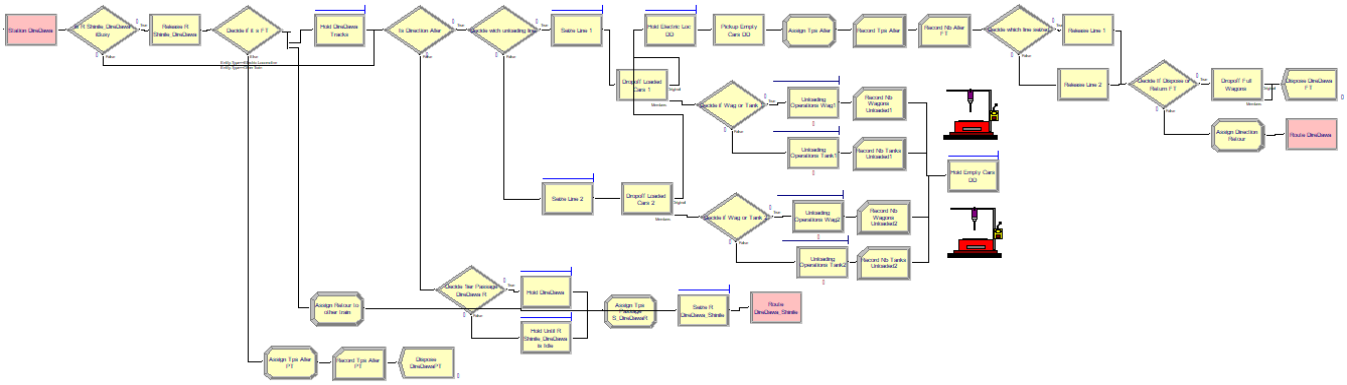


Figure 9. Operations at the production site.

4 EXPERIMENTAL RESULTS

4.1 Key performance indicators (KPIs)

We identified some performance indicators to guide the analysis of the simulation results and make informed decisions regarding capacity enhancement. In our study, the key indicators include:

- **Number of trips**: represents the average number of round trips made by freight trains (dedicated to OCP) during the designated simulation period.
- **Waiting time**: refers to the average waiting time per train during the whole round trip.
- **Waiting time at stations**: refers to the average waiting time per train at each of the two tracks (T1 and T2) of every station.

4.2 Uncertainty sources

Generally, three uncertainty sources are considered:

- Random arrivals of freight trains other than those dedicated to OCP

Due to the uncertainty regarding the use of the railway by other freight trains, we have considered three scenarios. In the first scenario, we assume no other freight trains are operating on the railway line. In the second scenario, one additional freight train is allowed to operate daily, with its departure time randomly determined following a uniform distribution between DMP and Dire Dawa. Finally, in the third scenario, two freight trains are permitted to operate per day, with their departure times also generated following a uniform distribution.

- Delays of passenger trains

In reality, delays can occur between two stations for several passenger trains. In our study, we assumed that 20% of the total number of passenger trains passing through the following specified routes are subject to delays:

- Nagad–Holhol
- Ali Sabieh–Guelile
- Ali Sabieh–Holhol

When a delay does occur, its duration is randomly drawn from a uniform distribution between 10 and 30 minutes. Moreover, independent of these delays, all passenger trains are scheduled to stop at Ali Sabieh station for a fixed duration of 5 minutes to allow for passenger disembarkation and boarding.

- Failures of loading, unloading, and locomotive change resources

Along the railway line, three stations are designed to perform specific operations using a set of resources.

- The DMP station is equipped with loading resources.
- The Nagad station handles locomotive changes.
- The production site station is equipped with unloading resources.

To account for the operational uncertainty regarding these resources, we introduced random failures and repair times, modeled through appropriate probability distributions:

For the loading and unloading resources, we assumed that the mean time between two failures (MTBF) follows an exponential distribution with a mean of 5 days. The mean time to repair (MTTR) is drawn from a uniform distribution ranging from 0 to 24 hours, capturing the variability in repair operations.

For the locomotive change resources at the Nagad station, failures are assumed to occur more frequently. The time between failures follows an exponential distribution with a mean of 8 hours, while repair durations are drawn from a uniform distribution between 0 and 2 hours.

The exponential distribution is used to model the time between failures because it is commonly adopted in reliability analysis for representing random and memoryless failure events.

Table 1. Characteristics of resource failures

Failure - Advanced Process

	Name	Type	Up Time	Up Time Units	Down Time	Down Time Units
1	Failure Loading Machine	Time	EXPO(5)	Days	UNIF(0 , 24)	Hours
2	Failure Unloading 1	Time	EXPO(5)	Days	UNIF(0 , 24)	Hours
3	Failure Unloading 2	Time	EXPO(5)	Days	UNIF(0 , 24)	Hours
4	Failure Loco Change	Time	EXPO(8)	Hours	UNIF(0 , 2)	Hours

4.3 Results analysis

This section is dedicated to presenting the test results for all considered scenarios, as well as analyzing these results by studying the impact of uncertainties on KPIs. Since we are dealing with stochastic parameters, it is important to note that we considered ten replications for the simulation of each scenario in order to obtain statistically significant results. It should also be noted that the simulation period considered is 720 hours, which is equivalent to 30 days.

Additionally, the values assigned to the number of trips and waiting time are the average of the ten replication means; that is, for each scenario, we first computed the mean value from each replication and then averaged these ten means to obtain the final reported values.

4.3.1 Scenario I: Single freight train dedicated to OCP

In this scenario, we assume the operation of a single freight train dedicated to OCP, consisting of 50 cars/tankers and two locomotives. We consider three sub-scenarios:

- Scenario I.1: No other trains are dedicated to transporting freight.
- Scenario I.2: A single train carrying other freight arrives at random intervals.
- Scenario I.3: Two trains carrying other freight arrive at random intervals.

➢ **Average number of trips**

Table 2. Average number of trips scenario I.1 – scenario I.3

Scenarios	Average number of trips /month
Scenario I.1	42

Scenario I.2	41
Scenario I.3	40

We find that when the railway line is used only by passenger trains, it can accommodate 42 trips per month of the OCP's freight train. However, the introduction of a freight train dedicated to other goods results in a loss of 2.5% of the track's capacity. And as (Table 2) shows, we observe a loss of 5% of capacity when we add two freight trains per day.

➢ **Average waiting time (Round trip)**

Table 3. Average waiting time per train

Scenarios	Waiting time in minutes
Scenario I.1	11.1
Scenario I.2	31.4
Scenario I.3	50.6

(Table 2) clearly illustrates the reduction in the number of trips made by OCP's freight train when an additional train dedicated to other freight is introduced. This decrease is primarily due to longer waiting times as more trains are added to the railway (Figure 3).

To study the impact of other uncertainty sources on performance indicators, we chose scenario I.2 as the baseline scenario for the arrival frequency of other freight trains.

- Scenario I.4: Delays of passenger trains
- Scenario I.5: Failures in loading resources
- Scenario I.6: Failures in unloading resources
- Scenario I.7: Failures in the resource changes of locomotives

➢ **Average number of trips**

Table 4. Average number of trips corresponding to scenarios related to breakdowns/delays (scenario I)

Scenarios	Average number of trips /month
Scenario I.2	41
Scenario I.4	41
Scenario I.5	39
Scenario I.6	38
Scenario I.7	40

(Table 4) shows that breakdowns in loading and unloading resources have a greater impact on railway line capacity compared to passenger train delays and locomotive change resource failures. Specifically, track capacity decreases by 4.9% and 7.3%, respectively, when breakdowns occur in loading and unloading resources.

➢ **Average waiting time (Round trip)**

Table 5. Average waiting times per train, corresponding to scenarios related to failures/delays (Scenario I)

Scenarios	Waiting time in minutes
Scenario I.2	31.4
Scenario I.4	34.0
Scenario I.5	34.6
Scenario I.6	33.2
Scenario I.7	46.0

(Table 5) shows that waiting times are highest in Scenario I.7, as trains must wait during locomotive changes when the corresponding resources experience frequent failures. Moreover, the waiting times observed in other scenarios are probably due to the priority given to passenger trains within the railway line.

▪ **Mean waiting time of Scenarios I.1 – Scenario I.7 at each station**

The mean waiting times for the seven scenarios associated with Scenario I at the eleven modeled stations and the two passing tracks are presented in (Figure 10). This representation allows us to assess the role of the passing tracks between stations.

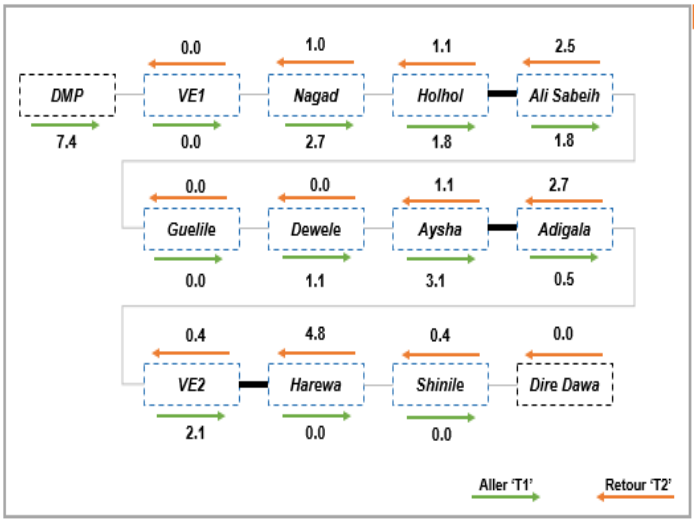


Figure 10. Mean waiting time in minutes at each station (Scenario I)

We observe from (Figure 10) that when we have three trains operating per day in the network; one for OCP, one for other freight, and one for passengers, the passing track VE1 is not used and the passing track VE2 is underutilized.

(Figure 10) also shows that at the ends of the Nagad 1 – Holhol 2 the average waiting time represents 11% of the average waiting time per train per trip. This is explained by the unavailability of locomotive change resources due to breakdowns. In addition, the waiting time between Holhol1 - Ali Sabeih 2, Aysha 1 - Adigala 2, and VE2 - Harewa 2 represents 13%, 17%, and 20% respectively of the average waiting time per trip. These delays are due to the fact that the distance between these pairs of stations is large, and before a train can leave its location, the next track must be clear since the railway line is single.

4.3.2 Scenario II: multiple trains can be used by OCP

In this scenario, we assume that we have six trains dedicated to OCP. Each of these trains is composed of 50 wagons/tankers and two locomotives. In all scenarios II.1 – II.5, we considered that the capacity of railway reserved for other goods is equivalent to one train per day.

- Scenario II.1: No breakdowns or delays are introduced.
- Scenario II.2: Delays of passenger trains
- Scenario II.3: Breakdowns of loading machines

- Scenario II.4: Breakdowns of unloading machines
- Scenario II.5: Breakdowns of locomotive change machines.

➢ **Average number of trips**

Table 6. Average number of trips corresponding to scenarios related to breakdowns/delays (Scenario II)

Scenarios	Average number of trips /month
Scenario II.1	218
Scenario II.2	214
Scenario II.3	199
Scenario II.4	206
Scenario II.5	214

Once again, we observe from (Table 6) that breakdowns of loading and unloading resources (Scenario II.3 and Scenario II.4) have a greater impact on the number of trips performed. Consequently, the capacity of the railway network is reduced by 8.7% and 5.5% respectively when loading and unloading resources break down.

➢ **Average waiting time (Round trip)**

Table 7. Average waiting time per train of scenarios related to failures/delays (Scenario II)

Scenarios	Average waiting time in minutes
Scenario II.1	189.1
Scenario II.2	189.5
Scenario II.3	190.2
Scenario II.4	166.7
Scenario II.5	191.0

(Table 7) shows that when eight or more trains are circulating on the railway line, the waiting times increase compared to scenarios with only three trains in operation. This is due to the fact that trains wait longer at stations to avoid conflicts along the segments between stations.

➢ **Mean waiting time of scenario II.1 – scenario II.5 at each station**

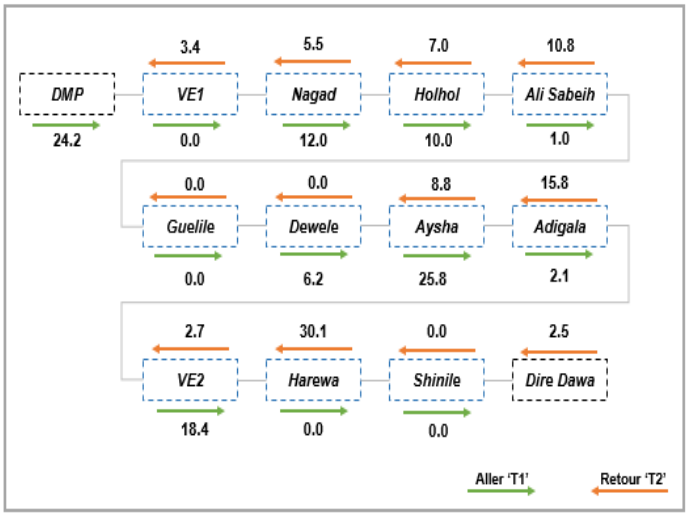


Figure 11. Mean waiting time in minutes at each station (scenario II)

(Figure 11) illustrates that despite the increased number of trains on the network, passing track VE1 remains largely unused. In contrast, passing track VE2 sees significantly higher utilization compared to Scenario I. Additionally, at the Nagad 1 – Holhol 2 station pair, the average waiting time constitutes 11% of the total waiting time per train per trip, primarily due to breakdowns in locomotive change resources at Nagad. Waiting times between Holhol 1 – Ali Sabeih 2, Aysha 1 – Adigala 2, and VE2 – Harewa 2 account for 12%, 23%, and 27%, respectively, of the average waiting time per trip. These results are consistent with those in (Figure 10), with the key difference being that Scenario II, which involves multiple trains, leads to additional delays along the railway line. Ultimately, the observed waiting times can be attributed to the single-track configuration and the long distances between these station pairs.

4.3.3 Maximum capacity of the modeled railway line

To assess the maximum capacity of the railway line under study, we test scenarios by varying the number of trains operated by OCP until the number of trips stabilizes. It is important to note that the results obtained are based on the data and assumptions used in the analysis.

Table 8. Maximum capacity of the railway

Number of trains	Average number of trips /month
1	42
2	84
3	121
4	157
5	189
6	218
7	245
8	245

(Table 8) shows that starting from seven trains, the number of trips remains constant despite further increases in the number of trains on the line. This indicates that the maximum capacity of the railway line is approximately 245 trips per month.

With each train encompassing 50 wagons/tankers each weighing 45 tons, we can transport 2,250 tons/train. Indeed, under the considered conditions, the annual capacity of the railway line is equivalent to 6.6 MTPA (Metric Ton Per Year).

Given that the fertilizer plant in Dire Dawa operates in two phases: phase 1 with a production capacity of 2.5 MTPA and phase 2 with a production capacity of 3.8 MTPA. This requires 2.3 MTPA of raw materials for phase 1 and 3.4 MTPA for phase 2. Under these conditions, the capacity of the railway is more than sufficient to transport the total demand of the production site for raw materials for both production phases (6.6 MTPA >> 3.4 MTPA).

4.4 Findings and Recommendations

Based on the analysis of the results obtained from scenarios I and II, we have drawn the following conclusions:

- Since the locomotive change resources are used by all types of trains during arrivals and departures, significant waiting times are observed. This is due to the fact that we only have a single resource. Indeed, we cannot change the locomotives of more than one train simultaneously.

- The passing tracks between two nearby stations do not really add value, i.e., the supposed passing track between DMP and the Nagad station (VE1).
- The passing tracks placed between two distant stations are crucial for facilitating train movement and reducing waiting times at stations, especially when multiple trains are operating in the network (scenario II). i.e., the assumed passing track between Adigala station and Harewa station (VE2).
- The maximum capacity of the railway line is 6.6 MTPA, almost double of the production site's demand for phase 2. This means that the total demand of the production site (phase 1 and phase 2) can be transported by rail.

In order to reduce waiting times at the stations, we suggest:

- Doubling the resources for locomotive changes when they are subject to breakdowns, leads to significant waiting times.
- Adding passing tracks between the most distant stations. For example, on the segments where more delays are observed:
    - Holhol – Ali Sabeih
    - Aysha – Adigala
    - VE2 – Harewa

Regarding the maximum capacity of the railway line, it should be noted that if the production capacity of the plant exceeds double the capacity planned for the second phase, then the demand for raw materials will exceed the maximum capacity of the line (6.6 MTPA). In this case, to transport the entire demand by rail, it would be necessary to redesign the railway network.

5 Conclusion

Through this work, we have studied the railway line connecting DMP and the production site in Dire Dawa. We have modeled the railway line using DES modules and considering operational rules and constraints. We have analyzed the railway capacity in the presence of uncertainty by exploring multiple scenarios.

The results of our simulation tests for different scenarios highlighted that the railway's capacity is influenced by several factors, including the number of trains in operation, train delays, and resource failures, especially given the single-track configuration of the line. By evaluating the maximum capacity, we found it to be approximately 6.6 MTPA, which is sufficient to meet the raw material demands of the fertilizer plant in both Phase 1 and Phase 2. However, if the plant's production capacity exceeds double the capacity planned for Phase 2, the demand for raw materials would surpass the railway's maximum capacity. In that case, redesigning the railway network by adding passing tracks or constructing a double-track system would be necessary, although these modifications could result in huge investments. This study demonstrates the relevance of considering operational constraints and uncertainty while evaluating the capacity and performance of railway networks.

6 References

D'Acierno, L., Botte, M., & Pignatiello, G. (2019). A simulation-based approach for estimating railway capacity.

Espinosa-Aranda, J. L., & García-Ródenas, R. (2012). A discrete event-based simulation model for real-time traffic management in railways. *Journal of Intelligent Transportation Systems, 16*(2), 94–107.

Högdahl, J., & Bohlin, M. (2023). A combined simulation-optimization approach for robust timetabling on main railway lines. *Transportation Science, 57*(1), 52–81.

Hu, H., Li, J., & Wu, S. (2022). Simulation evaluation of a current limiting scheme in an urban rail transit network. *Sustainability, 15*(1), 375.

Lindfeldt, A. (2015). *Railway capacity analysis: Methods for simulation and evaluation of timetables, delays and infrastructure* (Doctoral dissertation, KTH Royal Institute of Technology).

Marinov, M., & Viegas, J. (2011). A mesoscopic simulation modelling methodology for analyzing and evaluating freight train operations in a rail network. *Simulation Modelling Practice and Theory, 19*(1), 516–539.

Middelkoop, D., & Bouwman, M. (2001). SIMONE: Large scale train network simulations. In *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference (Vol. 2, pp. 1042–1047).* IEEE.

Mikulčić, M., & Mlinarić, T. J. (2021). Railway capacity enhancement with modern signalling systems – A literature review. *Promet - Traffic & Transportation, 33*(1), 141–152.

Singhania, V., & Marinov, M. (2017). An event-based simulation model for analyzing the utilization levels of a railway line in an urban area. *Promet - Traffic & Transportation, 29*(5), 521–528.

Tischer, E., Nachtigall, P., & Široký, J. (2020). The use of simulation modelling for determining the capacity of railway lines in the Czech conditions. *Open Engineering, 10*(1), 224–231.

Woroniuk, C., & Marinov, M. (2013). Simulation modelling to analyse the current level of utilisation of sections along a rail route. *Journal of Transport Literature, 7*, 235–252.

Yeung, H., & Marinov, M. (2017). A state of the art on railway simulation modelling software and its application to designing baggage transfer service. *RailExchange*.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Outil d'aide à la décision pour la stabilisation rapide du processus d'ultrafiltration dans la fabrication du fromage à la crème

LOÏC PARRENIN[1], AMBRE DUPUIS[2], CHRISTOPHE DANJOU[1]

[1] Département de mathématiques et de génie industriel, Polytechnique Montréal
2500 Chem. de Polytechnique, Montréal, QC H3T 0A3, Canada
loic.parrenin@polymtl.ca ; christophe.danjou@polymtl.ca

[2] Département de génie industriel
Université du Québec à Trois-Rivières
3351, boulevard des Forges, Trois-Rivières, QC, G8Z 4M3, Canada
ambre.dupuis@uqtr.ca

Résumé –
L'industrie fromagère innove pour répondre au besoin de diversification, d'économie, mais aussi de respect des normes en vigueur. Une étape cruciale dans le respect des normes de qualité réside dans le processus d'ultrafiltration. La gestion du facteur de concentration lors de l'ultrafiltration (UF) est un enjeu majeur, impactant directement la qualité et la productivité du processus. Cette étude vise à développer un outil capable de prédire le facteur de concentration de l'UF utilisé par un opérateur qualifié lorsque le processus est hors contrôle (lorsque les seuils qualité sont dépassés). L'outil proposé basé sur la valorisation de données réelles par la régression linéaire, a permis de prédire la valeur de ce facteur au temps t+1 avec un R^2 de 0,977 et un RMSE de 0,028. Cet outil permet d'élargir des recherches existantes en introduisant un modèle ensembliste, capable aux productions régulières et hors contrôle. L'intégration de cet outil dans un environnement de production industrielle favorise la résilience des processus face à la pénurie de main-d'œuvre et contribue à la réduction des pertes et du gaspillage alimentaire. Cependant des limites persistent comme l'interconnexion des systèmes, l'évaluation d'autres modèles de prévision ou l'analyse de l'impact économique et organisationnel de sa mise en œuvre.

Abstract – **The cheese industry is innovating in response to the need for diversification, cost savings and compliance with current standards. A crucial stage in meeting quality standards is the ultrafiltration process. Managing the concentration factor during ultrafiltration (UF) is a major challenge, with a direct impact on the quality and productivity of the process. The aim of this study is to develop a tool capable of predicting the UF concentration factor used by a qualified operator when the process is out of control (when quality thresholds are exceeded). The proposed tool, based on the use of real data using linear regression, was able to predict the value of this factor at time t+1 with an R^2 of 0.977 and an RMSE of 0.028. This tool makes it possible to extend existing research by introducing an ensemble model, capable of regular and out-of-control production. The integration of this tool into an industrial production environment promotes the resilience of processes in the face of labour shortages and helps to reduce losses and food waste. However, there are still limitations, such as the interconnection of systems, the evaluation of other forecasting models and the analysis of the economic and organisational impact of its implementation.**

Mots clés - Industrie 4.0, apprentissage automatique, fromage à la crème, ultrafiltration, contrôle des processus
Keywords – Industry 4.0, machine learning, cream cheese, ultrafiltration, process control

1 INTRODUCTION

D'ici 2032 la production mondiale de lait devrait atteindre les 1039 millions de tonnes, soit une augmentation de 1.5% par année sur la décennie à venir (OECD/FAO, 2023). Cette hausse de la production mondiale aura un impact sur le second produit laitier le plus consommé au monde : le fromage (OECD/FAO, 2023).

L'industrie fromagère innove pour répondre aux exigences d'un marché concurrentiel, où les besoins antagonistes de diversité et de réduction des coûts sont rois (Womack, Jones, & Roos, 2007) (Salkin, Oner, Ustundag, & Cevikcan, 2018). Ainsi, l'artisanat a laissé place à la mécanisation et à l'automatisation, permettant une production massive de fromage avec une ambition de qualité constante, de réduction des coûts et de réduction des risques de contamination (Johnson, 2017).

L'ultrafiltration (UF) est une des technologies ayant permis cette transition. L'UF est une étape cruciale dans le processus

de transformation fromager puisqu'elle concentre le gras et les protéines contenues dans la matière première tout en limitant la quantité d'eau, de minéraux et de lactose présent de dans le produit fini (Johnson, 2017). Dans le processus de transformation du fromage, variété de fromage plébiscité par les consommateurs avec une part de marché estimé à 8,3 milliards de dollars d'ici 2026 (Wolfschoon Pombo, 2021), l'UF constitue l'ultime étape permettant de limiter efficacement le taux d'humidité présent dans le produit fini. Or, ce taux d'humidité est réglementé (Gouvernement du Canada, 2025) et constitue un impératif dans les spécifications clients. Le dépassement des tolérances de qualité entraîne des rejets systématiques, tandis que les écarts de qualité inférieurs à la tolérance maximale entraînent des pertes de volume. Ainsi, l'ajustement du facteur UF devient une question primordiale impactant la qualité, la productivité et la rentabilité de la production (Wolfschoon Pombo, 2021).

Le savoir tacite des opérateurs acquis avec l'expérience est utilisé pour déterminer le facteur de concentration UF, sensible à de multiples facteurs externes, afin d'obtenir le meilleur ratio rendement/qualité. Mais la pénurie actuelle de main-d'œuvre et de compétences met en péril les systèmes de production.

Il est donc essentiel de capitaliser l'expertise d'une main-d'œuvre multigénérationnelle (OECD, 2023) et de développer des outils pour soutenir les systèmes de production qui doit continuer à fonctionner malgré des risques importants d'absentéisme et de forte rotation (Vahedi-Nouri, Tavakkoli-Moghaddam, Hanzálek, & Dolgui, 2022).

Les technologies de l'industrie 4.0 peuvent apporter des réponses à ces défis de flexibilité et de robustesse (Kumar & Nayyar, 2020), d'autant que l'industrie laitière s'inscrit dans cette nouvelle ère en générant de grandes quantités de données (Hassoun, et al., 2023) et en s'orientant vers des modèles de prise de décision utilisant l'analyse des données et les jumeaux numériques (Udugama, Kelton, & Bayer, 2023).

(Parrenin, Dupuis, Danjou, & Agard, 2025) ont proposé un outil d'apprentissage automatique permettant de contrôler du facteur de concentration de l'UF afin de maximiser le rendement de production du fromage à la crème tout en respectant les contraintes de qualité. Cependant, cet outil se limite à un processus de production contrôlé. À notre connaissance, aucun outil ne permet de régler le facteur de concentration de l'UF lorsque le processus est hors de contrôle.

Cette étude a donc pour objectif de développer un outil d'apprentissage automatique permettant de prévoir le facteur de concentration de l'UF lorsque le processus est hors contrôle (taux d'humidité supérieur aux normes en vigueur).

Le développement d'outils d'aide à la décision basés sur des données de fabrication réelles vise à assurer la continuité de la production malgré le risque de perte d'expertise et la pénurie actuelle de main-d'œuvre, et favorise le transfert de connaissances. En outre, la capacité retrouver rapidement un processus sous contrôle répondant aux normes de qualité en vigueur améliore la rentabilité d'un processus de production coûteux et réduit le gaspillage alimentaire, contribuant ainsi aux objectifs de développement durable 9 et 12 des Nations Unies (United Nations - Department of Economic and Social Affairs, 2025).

La suite de l'article est organisée comme suit : la section **2** présentera un survol des éléments importants concernant l'industrie fromagère, le processus d'ultrafiltration ainsi que les technologies de l'industrie 4.0. La section **3** proposera la méthodologie employée dans la recherche tandis que la section **4** présentera les résultats obtenus, lorsqu'appliquée à une étude de cas réelle. La section **5** visera à discuter des résultats obtenus tandis que la section **6** conclura l'étude.

2 PROCESSUS DE TRANSFORMATION DU FROMAGE À LA CRÈME

2.1 L'industrie fromagère

En 2020, la production fromagère mondiale a été estimée à 21,3 millions de tonnes (représentant entre 65 et 68 milliards de dollars américains) (Wolfschoon Pombo, 2021). En Europe et en Amérique du Nord, le fromage est le produit laitier transformé le plus consommé en termes d'extrait sec du lait et les projections de consommation continuent de croitre (OECD/FAO, 2023). Initialement proposée faciliter la conservation, le transport, mais aussi la digestion du lait (Salque, et al., 2012), la production fromagère à bien évoluée depuis ses origines pastorales des années 6500 av. J.-C. (Kindstedt, 2012).

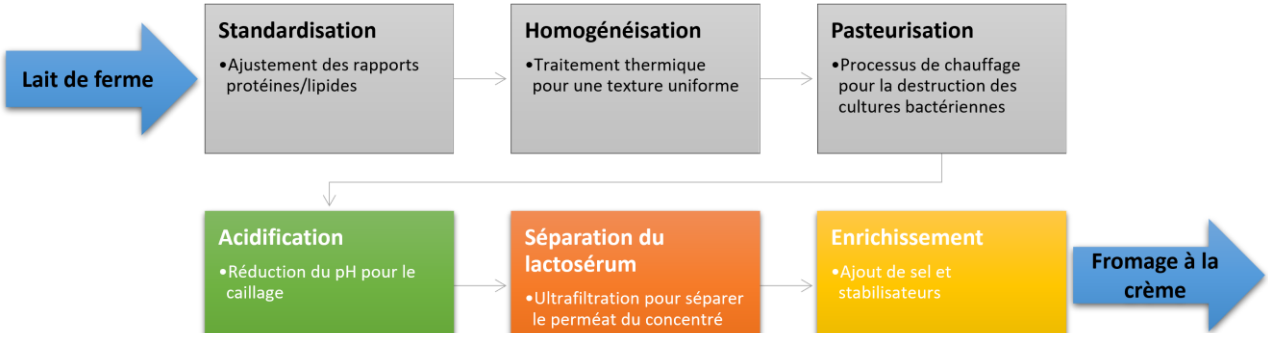


Figure 1 : processus général de production du fromage à la crème

Le XIXe siècle (1870-1880) marque l'apparition de la production d'un nouveau type de fromage aux États-Unis : le fromage à la crème (Wolfschoon Pombo, 2021). Encore aujourd'hui, ce fromage revête une importance économique croissante pour l'industrie alimentaire avec marché mondial projeté atteindre les 8,3 milliards de dollars d'ici 2026 (Wolfschoon Pombo, 2021). La Figure 1 illustre le processus général de production du fromage à la crème tel que décrit par (Phadungath, 2005) (Wolfschoon Pombo, 2021).

Le lait de ferme est d'abord standardisé afin d'obtenir un rapport protéines/lipides spécifique, en fonction de la teneur en eau et en lipides désirée pour le produit final.

Par la suite, le lait est homogénéisé par un traitement thermique, puis pasteurisé selon différents niveaux initiaux de culture, de température et de temps d'incubation.

Le liquide est alors acidifié à un niveau de pH déterminé.

Cette acidification permet de faire cailler le lait pour ensuite procéder à la séparation du lactosérum en deux sous-produits :

le perméat (également connu sous le nom de petit-lait) et le concentré (également appelé caillé).
Ce concentré est alors enrichi d'ingrédients tels que du sel et des stabilisateurs. Ce mélange peut alors être livré au processus d'emballage à froid ou être soumis à d'autres étapes de traitement, telles que l'opération d'homogénéisation, de cisaillement, de mélange d'ingrédients, de saveur et de cuisson selon le type de produit final souhaité.
La composition du fromage à la crème est réglementée (Gouvernement du Canada, 2025) avec des caractéristiques de qualité spécifiques devant être contrôlées au fil de la production. L'un des outils couramment utilisés pour contrôler les caractéristiques de qualité dans l'industrie agroalimentaire est la spectroscopie dans le proche infrarouge (NIR) (Huang, Yu, Xu, & Ying, 2008).

2.2 La technologie NIR en agroalimentaire

La spectroscopie correspond à l'étude de l'interaction de la matière avec le rayonnement électromagnétique (Gupta, Das, & Singh, 2023). Lorsque les longueurs d'onde utilisées sont comprises entre 780 et 2500 nanomètres, on parle alors de spectroscopie dans le proche infrarouge (NIR) (Porep, Kammerer , & Carle, 2015) (Nicolaï, et al., 2007). De manière générale, la spectroscopie fournit des informations précieuses sur la structure, la composition et les propriétés de diverses substances. Dès 1970, le NIR suscite l'intérêt du secteur agroalimentaire avec les premiers travaux permettant de prouver le potentiel de la réflectance infrarouge pour l'évaluation rapide de la qualité des fourrages (Norris, Barnes, Moore, & Shenk, 1976) et des gruaux d'avoine (Norris, K.H., 1982). Ces recherches ont révélé une relation linéaire significative entre l'intensité d'absorption à certaines longueurs d'onde et des propriétés spécifiques liées à la qualité des aliments. L'utilisation du proche infrarouge se distingue par son caractère non destructif et non invasif, ce qui en fait une méthode d'analyse particulièrement adaptée en contexte industriel, en réduisant les coûts et les pertes associés aux analyses destructives en laboratoire.
La technologie NIR est donc une solution innovante pour le contrôle qualité des productions agroalimentaires en temps réel. Cependant, il convient de noter deux inconvénients majeurs. D'une part les mesures sont limitées aux caractéristiques présentes en quantités relativement importantes. Dans le cas des grains de blés par exemple, seules les caractéristiques représentant plus de 0.1% de la masse d'un grain pourraient être détectées (Dowell & Maghirang, 2002). D'autre part, cette technologie est sensible au calibrage et nécessite donc des modèles d'étalonnage robustes ainsi qu'un transfert d'étalonnage entre les instruments NIR pour analyser avec précision les propriétés alimentaires souhaitées (Kondepati & Heise, 2008).

3 METHODOLOGIE

Afin de répondre au besoin d'assistance dans le réglage du facteur de concentration de l'UF lorsque le processus est hors de contrôle, nous proposons d'élargir l'outil proposé par (Parrenin, Dupuis, Danjou, & Agard, 2025), par le développement d'un modèle ensembliste.
La méthodologie en 4 étapes proposée à la Figure 2 (en rose) permet de compléter la méthodologie de (Parrenin, Dupuis, Danjou, & Agard, 2025), proposant une correction du facteur de concentration de l'UF dépendante du statut de la production (sous -contrôle ou hors de contrôle).

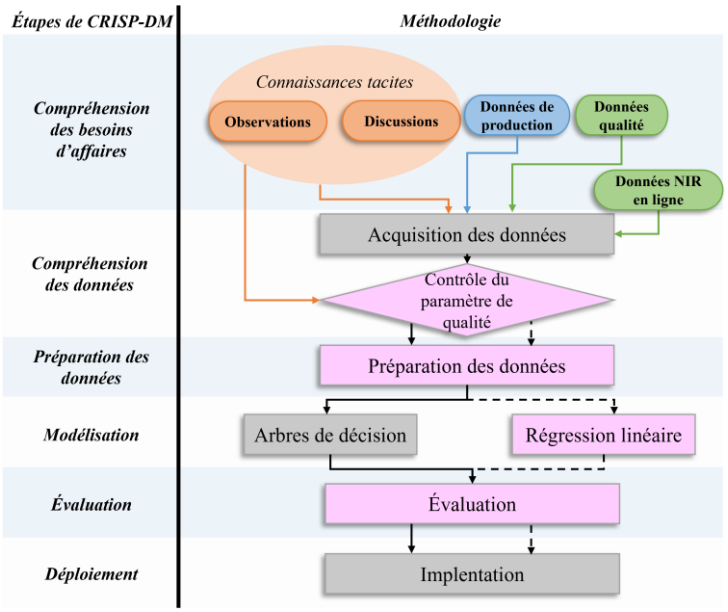


Figure 2 : Méthodologie générale

La méthode CRISP-DM (Schröer, Kruse, & Marx, 2021) est utilisée afin de répondre adéquatement aux besoins de l'entreprise. La première étape de **compréhension des besoins d'affaires** est réalisée à l'aide d'observation du processus de transformation et d'entrevues semi-structurées avec les opérateurs. Ceci permet de cerner les connaissances tacites utilisées lors de l'étape d'ultrafiltration, mais aussi d'identifier les informations de production et de qualité pertinentes contenues dans les systèmes d'information de l'entreprise.
Les observations et données pertinentes sont colligées lors de la phase **de compréhension des données**. A cette étape, les informations et leur compréhension sont validées auprès des parties prenantes de l'entreprise pour assurer la véracité et l'entièreté de l'information collectée. La **compréhension des besoins d'affaires** et la **compréhension des données** renforcent mutuellement jusqu'à ce qu'un ensemble représentatif de données soit acquis et puisse être préparé.
Puisque le processus d'ultrafiltration est soumis à une norme de qualité, la production peut être considérée comme contrôlée ou hors de contrôle. Si la **caractéristique de contrôle de la qualité** dépasse le seuil défini par la connaissance tacite des opérateurs, la production est considérée comme hors de contrôle et le paramètre influent doit être corrigé (ligne pointillée de la Figure 2). Dans le cas contraire, la production est considérée comme maîtrisée et le paramètre doit être géré pour faire face à la variabilité normale de la production (ligne pleine de la Figure 2) tel que proposé par (Parrenin, Dupuis, Danjou, & Agard, 2025). Les données relatives à l'étape d'ultrafiltration lorsque celle-ci est hors contrôle sont isolées et seront l'objet de la présente étude.
Les données sont alors préparées. Au cours de l'étape de **préparation des données**, les données de production sont formatées en segments de production de paramètres constants. Les données de qualité sont associées à chacun des segments de production générés. Les valeurs aberrantes et manquantes sont gérées à l'aide de la connaissance métier. Dans une démarche d'ingénierie des caractéristiques, un nouvel attribut est également défini en intégrant les informations complémentaires de l'équipement *NIR en ligne* (Porep, Kammerer , & Carle, 2015). L'attribut relatif au paramètre de contrôle de la qualité est alors transformé afin de représenter la différence entre la valeur mesurée par le NIR et le seuil de la caractéristique de qualité contrôlée. Les données sont divisées

en deux ensembles distincts. L'ensemble d'entraînement est dédié à la phase de modélisation tandis que l'ensemble de test est réservé à la phase d'évaluation des performances du modèle. Les ensembles de données sont normalisés à l'aide d'une échelle standard.

Les données préparées sont alors utilisées lors de la phase de **modélisation** afin de proposer des modèles d'apprentissage automatique pouvant prévoir le rendement de l'étape d'ultrafiltration en fonction des attributs de production considérée considérant un processus hors contrôle. Pour reproduire l'ajustement itératif et progressif des opérateurs lorsque la production dépasse le seuil de qualité requis, un modèle de régression linéaire est choisi.

Après avoir entraîné le modèle sur l'ensemble d'apprentissages, ses performances sont analysées lors de l'étape d'**évaluation**. L'explication par le modèle des variations observées est mesurée à l'aide du *coefficient de détermination* (**R²**) (Abdel-Basset, Moustafa, & Hawash, 2022). L'erreur de prévision est quant à elle évaluée à l'aide de la racine de l'erreur quadratique moyenne (**RMSE**) (Abdel-Basset, Moustafa, & Hawash, 2022). Les deux métriques sont respectivement décrites par les équations 1 et 2.

$$R^2(y,\hat{y}) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

$$\mathrm{RMSE}(y,\hat{y}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (2)$$

Où :

y_i: *valeur réelle de la* $i^{ème}$ *observation dans l'ensemble de données test*

$\hat{y}_i$: *valeur prévue par le modèle pour la* $i^{ème}$ *observation dans l'ensemble de données test*

$\bar{y}$: *valeur moyenne de y dans l'ensemble de données test*

La phase **d'implantation** est quant à elle la même que celle présenté dans l'étude de (Parrenin, Dupuis, Danjou, & Agard, 2025)

4 RESULTATS

4.1 Étude de cas

Cette recherche est la suite du projet mené par (Parrenin, Dupuis, Danjou, & Agard, 2025) en collaboration avec un partenaire industriel opérant dans le secteur du fromage à la crème. Le partenaire a fourni plusieurs années de données de production, comprenant à la fois les réglages des machines et les indicateurs de qualité du produit final.

La méthodologie proposée a été mise en œuvre à l'aide de *Python 3.8* dans le cadre d'une étude de cas empirique réalisée dans une usine de production de fromage à la crème située au Québec, Canada, sur la période 2022-2023.

4.2 Compréhension des besoins d'affaires

L'étape cruciale de ce processus est la séparation du lactosérum, qui est réalisée par un procédé d'ultrafiltration (UF). Cette étape a pour objectif de séparer le perméat du concentré par ultrafiltration. Ce processus est schématisé par la Figure 3.

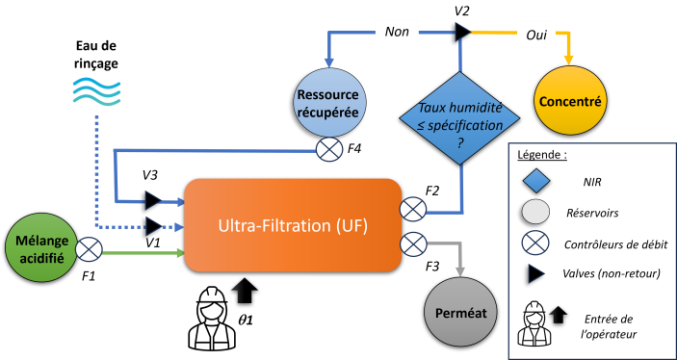


Figure 3 : Processus d'ultrafiltration

Le mélange acidifié (en vert) traverse les membranes de l'UF (en orange), permettant la séparation du concentré, composé d'éléments solides riches en matières grasses et en protéines (en jaune), et du perméat (rejet de la production en gris). Ce dernier contient principalement de l'eau, des minéraux et du lactose.

Le paramètre contrôlable $\boldsymbol{\theta_1}$ représentant le facteur de concentration de l'UF, ainsi que le taux d'humidité du concentré en sortie, joue un rôle clé dans la régulation du processus. Lorsque le taux d'humidité dépasse le seuil toléré, une augmentation de $\boldsymbol{\theta_1}$ est appliquée pour intensifier la filtration, réduisant ainsi l'humidité du concentré. Cette action entraîne toutefois une diminution du volume de concentré et une augmentation de la quantité de perméat.

Au début du cycle de production ou en cas de dépassement du seuil d'humidité (processus hors contrôle), le flux en sortie de l'UF est dirigé vers le silo de ressource récupérée (RR, en bleu) jusqu'à ce que $\boldsymbol{\theta_1}$ soit ajusté correctement pour atteindre le taux d'humidité requis. Cet ajustement, réalisé par un opérateur expérimenté, se fait par un processus d'essai-erreur. L'opérateur utilise les informations d'un capteur NIR placé à la sortie de l'étape d'ultrafiltration. Ce capteur permet d'avoir une indication en temps réelle de l'évolution du taux d'humidité dans le mélange. Cependant, la valeur absolue proposée par le capteur est erronée de par les conditions d'exploitations de la machine. Une fois la valeur du NIR sur la ligne de production stabilisé, un échantillon est testé par un autre équipement NIR situé dans le département de qualité afin d'avoir la valeur exacte du taux d'humidité contenu dans la production. Lorsque le taux d'humidité requis est atteint, le flux en sortie est redirigé vers le silo de concentré.

À la fin du cycle de production, un rinçage est réalisé pour récupérer le mélange acidifié résiduel présent sur les parois et les membranes de l'équipement avant le nettoyage. Ce flux de rinçage est également envoyé vers le silo de ressource récupérée, qui peut être réutilisée dans un cycle de production ultérieur. Cependant, l'incorporation de cette ressource, issue du mélange de produits différents et d'eau de rinçage, induit une certaine variabilité dans les performances du processus d'ultrafiltration.

La recherche de (Parrenin, Dupuis, Danjou, & Agard, 2025) a permis le développement d'un outil d'aide à la décision pour le contrôle du facteur de concentration de l'UF à l'aide d'arbre de décision dans des conditions normales de production. Cet outil vise à la maximisation du rendement de production du fromage à la crème, par la valorisant l'expérience des opérateurs contenue dans les données historiques. Cependant, cet outil ne permet pas le réglage du paramètre $\boldsymbol{\theta_1}$ lorsque la production est hors de contrôle (taux d'humidité supérieur à la norme).

Or, la perte de contrôle sur le procédé occasionne une perte importante de matière, ce qui impacte négativement la productivité de la ligne. Ainsi, lorsque le processus devient

hors de contrôle avec un taux d'humidité devient supérieur à la norme, le paramètre $\boldsymbol{\theta_1}$ doit être corrigé le plus rapidement possible afin de retrouver un taux d'humidité inférieur au seuil de qualité fixé afin de limiter la perte de production. Le retour rapide à une production de qualité est essentiel afin d'optimiser l'efficacité du processus de transformation du lait, qui plus est face à l'augmentation des coûts des matières premières.

4.3 Compréhension des données

Les données collectées sont similaires à celles collectées par (Parrenin, Dupuis, Danjou, & Agard, 2025).

Les flux de matières (Qt_E, Qt_{RR}, Qt_S) (en gallons impériaux par minute) sont quantifiés et horodatés à la milliseconde près à l'aide des données de production liées aux régulateurs de débit (*F1, F2, F3*). Cependant, lorsque la production est hors de contrôle, l'ensemble de cette production est considéré comme de la ressource récupérée. Ainsi, en production hors de contrôle, Qt_S est toujours nulle. Cette information n'est donc pas utilisée et est retirée de l'ensemble de données. La valeur et les l'horodatage (à la milliseconde) des changements de valeur du paramètre $\boldsymbol{\theta_1}$ au cours de la production permet de suivre l'évolution du paramètre. Les données relatives au taux d'humidité *H*, évalué par le département de qualité sur une machine calibrée au cours de la production, sont extraites des données de qualité.

Les flux de matières (Qt_E, Qt_{RR}, Qt_S), la teneur en humidité (*H*) et $\boldsymbol{\theta_1}$ sont définis comme des variables continues.

Afin d'utiliser l'ensemble des informations utilisées par les opérateurs lorsque le processus est hors de contrôle, la base de données est élargie avec données du NIR de la ligne de production. Les données NIR sont collectées à une fréquence de 1Hz et stockées sur l'historien *Pi*.

4.4 Préparation des données

L'étape de préparation des données reprend celle présenté dans l'article de (Parrenin, Dupuis, Danjou, & Agard, 2025). Les productions sont séquencées de sorte que le paramètre $\boldsymbol{\theta_1}$ soit constant dans chacune d'entre elles.

Cinq types de produits sont transformés. Les variables continues Qt_E, Qt_{RR} sont discrétisées en fonction des différents types de produit (allant de A à E). Générant ainsi 10 attributs binaires.

Cette discrétisation répond à une contrainte pratique des opérateurs qui, en temps réel, sont en mesure de savoir quel type de produit est utilisé sans pour autant savoir la quantité exacte utilisée.

Le paramètre $\boldsymbol{\theta_1}$ est utilisé pour caractériser la course. Un nouvel attribut est généré en translatant les séquences d'un incrément de temps afin d'obtenir l'attribut $\boldsymbol{\theta_{1\,;\,t+1}}$. $\boldsymbol{\theta_{1\,;\,t+1}}$ représente la valeur choisie par l'opérateur au temps t+1 pour corriger le paramètre $\boldsymbol{\theta_1}$ est revenir à une production en contrôle est également ajouté à chaque enregistrement au temps t. le paramètre $\boldsymbol{\theta_{1\,;\,t+1}}$ est la variable dépendante que le modèle visera à prévoir afin d'aiguiller les opérateurs dans leurs réglages.

Finalement, le taux d'humidité transformé représentant la différence de la valeur du NIR au temps t et le seuil légal du taux d'humidité fixé de 55% (Gouvernement du Canada, 2025) constitue le dernier élément de l'ensemble de données.

Celui-ci est alors séparé en un ensemble d'entrainement et un ensemble de tests comportant respectivement 75% et 25% des enregistrements.

Ces ensembles de données sont respectivement normalisés à l'aide d'une échelle standard proposée par la librairie S*cikit-Learn* (Scikit-learn, 2025).

4.5 Modélisation

Les données de l'ensemble d'entraînement sont finalement utilisées pour ajuster la droite de régression proposée par la librairie *Scikit-Learn (*Scikit-Learn, 2025). Celle-ci permet de modéliser le comportement du paramètre $\boldsymbol{\theta_1}$ au temps t+1 en fonction de la présence ou de l'absence des produits A à E dans la ressource récupérée ou le mélange acidifié, la valeur du paramètre $\boldsymbol{\theta_1}$ au temps t ainsi que la différence entre la valeur d'humidité affichée par le NIR et le seuil d'humidité maximal à ne pas dépasser.

4.6 Évaluation

Le modèle obtenu est ensuite évalué à l'aide des données contenues dans l'ensemble de tests. La prévision proposée par le modèle pour chaque enregistrement de données est comparée à la valeur de $\boldsymbol{\theta_1}$ au temps t+1 réellement été utilisé par un opérateur qualifié. Cette comparaison permet le calcul du coefficient de détermination, atteignant un R^2 de 0.977, et de la racine de l'erreur quadratique moyenne, avec un RMSE de 0.028.

4.7 Implantation

Ce nouveau modèle est intégré à l'interface GUI proposée par (Parrenin, Dupuis, Danjou, & Agard, 2025). Lorsque le taux d'humidité entré par l'opérateur est supérieur à la norme établie dans le système, un message d'alerte et le modèle de prévision pour la stabilisation du processus hors contrôle est automatiquement utilisés. Ainsi, l'interface reste équivalente à celle proposée dans l'étude précédente. Seul le programme utilisé est changé pour proposer un modèle ensembliste à la place d'un modèle unique de prévision par arbre de décision.

5 DISCUSSION

Cette étude a permis de développer un outil d'apprentissage automatique capable de prévoir avec précision le facteur de concentration de l'UF lorsque le processus est hors contrôle, atteignant un R^2 de 0,977 et un RMSE de 0,028. L'approche proposée s'inscrit dans une démarche d'amélioration continue, en élargissant le modèle initial de prévision basé sur les arbres de décision (Parrenin, Dupuis, Danjou, & Agard, 2025) pour proposer un modèle ensembliste. Ce dernier présente l'avantage d'être adapté tant à une production régulière qu'à une production hors contrôle. Cependant, plusieurs limites et pistes de recherche subsistent, ouvrant la voie à des opportunités d'améliorations futures.

D'une part, l'intégration directe du capteur NIR (spectroscopie dans le proche infrarouge) au programme lié à l'interface graphique utilisateur (GUI) constitue une avancée potentielle pour renforcer la réactivité du système. Une telle connexion pourrait permettre de détecter immédiatement une production hors contrôle et d'ajuster en temps réel le paramètre critique θ1, améliorant ainsi la robustesse opérationnelle du processus.

D'autre part, il serait pertinent de tester d'autres modèles de régression, tels que Lasso ou ElasticNet, afin d'évaluer leur capacité à mieux régulariser les variables et potentiellement renforcer la performance prédictive dans des scénarios variés.

La qualité des données d'entrée, notamment celles issues de capteurs NIR décalibrés, soulève également des questions importantes. Une analyse approfondie sur l'impact de ces données décalibrées sur les performances du modèle est nécessaire. De plus, cela invite à repenser l'utilisation du capteur NIR décalibré : des alternatives plus simples et

robustes pourraient être envisagées pour réduire la complexité et les risques associés à ces données.

Au-delà des considérations techniques, une attention particulière doit être portée à l'acceptabilité de l'outil par les opérateurs et à sa mise en œuvre sur le terrain. Une étude sociotechnique explorant les facteurs d'adhésion des utilisateurs et les conditions favorables à son adoption serait bénéfique. Par ailleurs, une analyse économétrique et financière permettant d'évaluer l'impact de cet outil ensembliste sur la productivité et la rentabilité de la ligne de production de fromage à la crème apporterait des arguments convaincants pour justifier son déploiement à grande échelle.

Enfin, le caractère généralisable de l'approche reste à démontrer. Tester cet outil dans d'autres structures de production et secteurs industriels pourrait valider sa pertinence et confirmer son potentiel d'application au-delà du cas spécifique étudié. Une telle extension permettrait d'explorer les ajustements nécessaires pour s'adapter aux contraintes spécifiques de diverses chaînes de production.

6 Conclusion

L'étude proposée permet de répondre à une problématique critique dans l'industrie fromagère : la gestion du facteur de concentration de l'UF lorsque le processus de production est hors contrôle. L'outil d'apprentissage automatique proposé basé sur la valorisation de données réelles par la régression linéaire, a permis de prédire la valeur du facteur de concentration de l'UF **(θ_1)** au temps t+1 réellement été utilisé par un opérateur qualifié avec un R^2 de 0,977 et un RMSE de 0,028. L'approche proposée élargit les travaux de (Parrenin, Dupuis, Danjou, & Agard, 2025) en introduisant un modèle ensembliste, capable de s'adapter aussi bien à une production régulière qu'à des scénarios perturbés.

Les résultats obtenus contribuent à améliorer la robustesse des systèmes de production dans un contexte marqué par une pénurie de main-d'œuvre qualifiée et une forte dépendance au savoir tacite des opérateurs. En intégrant les technologies de l'industrie 4.0, notamment les outils d'apprentissage automatique, cette recherche participe à la transformation numérique de l'industrie laitière, tout en renforçant la résilience des processus de production.

Cependant, des perspectives d'amélioration subsistent. Il est essentiel d'approfondir l'analyse de la qualité des données, d'explorer d'autres modèles de régression pour une régularisation accrue et d'évaluer la robustesse du système face à des données décalibrées. Par ailleurs, la connectivité directe des capteurs NIR à une interface utilisateur et l'évaluation de l'impact économique et organisationnel de l'outil constituent des axes prioritaires pour la mise en œuvre à grande échelle. Enfin, la généralisation de l'outil à d'autres structures de production représenterait une avancée significative pour confirmer sa pertinence dans des contextes industriels variés.

En plus de contribuer à l'amélioration de la rentabilité et de la qualité des produits, cette étude s'inscrit dans une démarche de durabilité en visant à limiter le gaspillage alimentaire et soutenant les objectifs de développement durable des Nations Unies.

7 Remerciements

Nous remercions notre partenaire industriel pour la mise à disposition de données et de connaissances spécialisées, ainsi que MITACS Stage de stratégie d'entreprise (IT36475) pour son soutien inestimable.

8 References

Udugama, I. A., Kelton, W., & Bayer, C. (2023). Digital twins in food processing: A conceptual approach to developing multi-layer digital models. *Digital Chemical Engineering, 7*, 100087. doi:10.1016/j.dche.2023.100087

Abdel-Basset, M., Moustafa, N., & Hawash, H. (2022). Evaluating Deep Neural Networks. Dans M. Abdel-Basset, N. Moustafa, & H. Hawash, *Deep Learning Approaches for Security Threats in IoT Environments* (p. 93). Wiley-IEEE Press.

Dowell, F., & Maghirang, E. (2002). Accuracy and feasibility of measuring characteristics of single kernels using near-infrared spectroscopy. *Proceedings of the ICC Conference*, 313-320.

Gouvernement du Canada. (2025, 01 22). *Site Web de la législation.* Récupéré sur Règlement sur les aliments et drogues (C.R.C., ch. 870) -- B.08.035 (1) [N]. Le fromage à la crème: https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/reglements/C.R.C.%2C_ch._870/page-28.html

Gupta, P., Das, S., & Singh, N. (2023). Introduction to Spectroscopy. Dans P. Gupta, S. Das, & N. Singh, *Spectroscopy* (p. Chapitre 1). New York: Jenny Stanford Publishing.

Hassoun, A., Garcia-Garcia, G., Trollman, H., Jagtap, S., Parra-López, C., Cropotova, J., . . . Aït-Kaddour, A. (2023). Birth of dairy 4.0: Opportunities and challenges in adoption of fourth industrial revolution technologies in the production of milk and its derivatives. *Current Research in Food Science, 7*, 100535. doi:10.1016/j.crfs.2023.100535

Huang, H., Yu, H., Xu, H., & Ying, Y. (2008). Near infrared spectroscopy for on/in-line monitoring of quality in foods and beverages: A review. *Journal of Food Engineering, 87*(3), 303-313. doi:10.1016/j.jfoodeng.2007.12.022

Johnson, M. (2017). A 100-Year Review: Cheese production and quality. *Journal of Dairy Science, 100*(12), 9952-9965. doi:doi.org/10.3168/jds.2017-12979

Kondepati, V., & Heise, M. (2008). The potential of mid-and near-infrared spectroscopy for reliable monitoring of bioprocesses. *Current trends in biotechnology and pharmacy, 2*(1), 117-132.

Kumar, A., & Nayyar, A. (2020). si3-Industry: A Sustainable, Intelligent, Innovative, Internet-of-Things Industry. Dans A. Kumar, & A. Nayyar, *A Roadmap to Industry 4.0: Smart Production, Sharp Business and Sustainable Development* (pp. 1-21). Springer, Cham.

Nicolaï, B., Beullens, K., Bobelyn, E., Peirs, A., Saeys, W., Theron, K., & Lammertyn, J. (2007). Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review. *Postharvest Biology and Technology, 46*(2), 99-118. doi:10.1016/j.postharvbio.2007.06.024

Norris, K., Barnes, R., Moore, J., & Shenk, J. (1976). Predicting Forage Quality by Infrared Replectance Spectroscopy. *Journal of Animal Science, 43*(4), 889-897. doi:10.2527/jas1976.434889x

Norris, K.H. (1982). Use of near-infrared reflectance spectroscopy and dye-binding techniques for estimating protein in oat groats. *Cereal Chem, 59*(5), 333-335.

OECD. (2023). *Retaining Talent at All Ages.* Paris: OECD Publishing.

OECD/FAO. (2023). *OECD-FAO Agricultural Outlook 2023-2032.* Paris: OECD Publishing. doi:https://doi.org/10.1787/08801ab7-en.

Parrenin, L., Dupuis, A., Danjou, C., & Agard, B. (2025). Machine learning tool for yield maximization in cream cheese production. *IN4PL 2024 : 5th International Conference on Innovative Intelligent Industrial Production and Logistics* (pp. 1-18). Porto, Portugal: Springer.

Phadungath, C. (2005). Cream cheese products: A review. *Songklanakarin Journal of Science and Technology, 27*(1), 191-199. Récupéré sur https://www.thaiscience.info/journals/Article/SONG/10462522.pdf

Porep, J., Kammerer , D., & Carle, R. (2015). On-line application of near infrared (NIR) spectroscopy in food production. *Trends in Food Science & Technology, 46*(2, Part A), 211-230. doi:10.1016/j.tifs.2015.10.002

Salque, M., Bogucki,, P., Pyzel, J., Sobkowiak-Tabaka, I., Grygiel, R., Szmyt, M., & Evershed, R. (2012). Earliest evidence for cheese making in the sixth millennium bc in northern Europe. *Nature, 493*(7433), 522–525. doi:10.1038/nature11698

Schröer, C., Kruse, F., & Marx, J. G. (2021). A Systematic Literature Review on Applying CRISP-DM Process Model. *Procedia Computer Science, 181*, 526-534. doi:10.1016/j.procs.2021.01.199

Scikit-Learn. (2025, 01 25). *LinearRegression.* Récupéré sur Scikit-Learn API Reference: https://scikit-learn.org/1.6/modules/generated/sklearn.linear_model.LinearRegression.html

Scikit-learn. (2025, 01 25). *StandardScaler.* Récupéré sur Scikit-learn API Reference: https://scikit-learn.org/1.6/modules/generated/sklearn.preprocessing.StandardScaler.html

United Nations - Department of Economic and Social Affairs. (2025, 01 22). *The 17 goals.* Récupéré sur Sustainable Development: https://sdgs.un.org/goals

Wolfschoon Pombo, A. (2021). Cream cheese: Historical, manufacturing, and physico-chemical aspects. *International Dairy Journal, 117*, 104948. doi:10.1016/j.idairyj.2020.104948

Womack, J., Jones, D., & Roos, D. (2007). *The machine that changed the world.* New York: Simon & Schuster.

Planification des Approvisionnements et Sélection des Producteurs Agricoles en Horizon Glissant

MANUELLA GERMANOS[1], OUSSAMA BEN-AMMAR[2], GREGORY ZACHAREWICZ[1]

[1] LABORATOIRE DES SCIENCES DES RISQUES, IMT MINES ALES
6 Av. de Clavières, Alès, France
{manuella.germanos ; gregory.zacharewicz}@mines-ales.fr

[2] EUROMOV DIGITAL HEALTH IN MOTION, UNIV MONTPELLIER, IMT MINES ALES
oussama.ben-ammar@mines-ales.fr

***Résumé* – Dans les circuits courts alimentaires, le détaillant doit prendre des décisions cruciales lorsqu'il choisit les producteurs auprès duquel acheter les produits. De plus, la planification sur de longues périodes complique davantage cette tâche. Ce travail présente un programme linéaire pour aider supermarché de produits locaux à planifier ses commandes auprès de différents producteurs agricoles et à déterminer le moment où les passer. Le modèle se base sur le concept de l'horizon glissant et est conçu pour traiter le problème du « choix de fournisseurs ». Le modèle proposé permet de planifier les approvisionnements auprès des différents producteurs tout en minimisant les coûts et les prix d'achat. Il est aussi capable de résoudre des instances de grande taille dans un temps de résolution raisonnable.**

***Mots clés* - Sélection des fournisseurs, lotissement, programmation linéaire, chaîne d'approvisionnement, horizon glissant.**

1 INTRODUCTION ET DESCRIPTION DU PROBLEME

Dans les entreprises, les commandes sont planifiées minutieusement auprès des fournisseurs pour répondre à la demande du marché et assurer la satisfaction des clients. Dans la chaîne d'approvisionnement alimentaire, les détaillants doivent passer leurs commandes plusieurs mois à l'avance afin que les producteurs agricoles aient le temps de planter et de cultiver les produits nécessaires. Cela soulève le problème de sélection des producteurs et de l'allocation des commandes, que la littérature scientifique l'appelle « problème de choix de fournisseurs » (Aouadni et al., 2019; Naqvi & Amin, 2021).

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet SMALLDERS, qui vise à assister tous les acteurs des circuits courts. Le projet étudie les différents besoins de ces circuits (Amamou et al., 2023; Longo et al., 2023; Miranda et al., 2023; Stefanini et al., 2023), développe des modèles pour analyser et améliorer leurs performances (Francesco Longo & Solina, 2024; Germanos et al., 2023a; Longo et al., 2024; Mallek-Daclin et al., 2024), et encourage ces acteurs à adopter de nouvelles technologies (Cimino et al., 2024). Dans le cadre de ce projet, nous avons également collaboré avec « Le Mas des Agriculteurs », un supermarché de produits locaux qui s'approvisionne en fruits et légumes auprès des petits exploitants de la région du Gard, dans le sud de la France, pour approvisionner des hôpitaux, des écoles et d'autres organisations des collectivités locales. Il est donc essentiel pour « Le Mas des Agriculteurs » de planifier rigoureusement toutes les commandes afin de garantir les livraisons en fruits et légumes tout en maximisant les commandes auprès des petits exploitants locaux. Ces derniers, que nous appelons par la suite « producteurs » ont chacun des contraintes de productions et des prix unitaires de vente.
De plus, lorsque ces producteurs ne peuvent pas répondre à la demande du Mas des Agriculteurs en raison de leur capacité de production limitée, ce dernier achète les produits auprès d'un fournisseur externe à un prix plus élevé.

Le principal défi auquel « Le Mas des Agriculteurs » est actuellement confronté est de décider la date et la quantité à commander chez chaque producteur. Et comme il s'engage sous contrat quand il passe chaque commande initiale douze mois à l'avance, la planification devient une tâche particulièrement critique. Par ailleurs, une fois qu'une commande est passée, « Le Mas des Agriculteurs » ne peut ni l'annuler ni la réduire, sous peine de pénalités. Une fois une commande passée, il peut uniquement augmenter son volume. Enfin, si nécessaire, « Le Mas des Agriculteurs » peut augmenter la quantité qu'il souhaite réceptionner d'un producteur jusqu'à six mois avant la date de livraison prévue, sinon le producteur risque de ne pas avoir le temps de produire la quantité supplémentaire demandée.

Pour surmonter ce défi, nous développons un modèle d'optimisation qui prend en compte la demande dynamique du « Mas des Agriculteurs », ainsi que les différentes contraintes des producteurs. Ces caractéristiques incluent :

- **Capacité de production dynamique** : Chaque petit exploitant a sa propre capacité de production, qui varie tout au long de l'année, passant par des phases de faible production et des phases de haute production.
- **Coût de stockage unitaire dynamique** : Chaque petit exploitant a son propre coût de stockage, qui varie au fil de l'année. Pendant les périodes de fortes chaleurs, les exploitants peuvent augmenter leurs coûts de stockage pour tenir compte de l'augmentation de la consommation d'énergie.
- **Capacité de stockage dynamique** : Chaque petit exploitant gère son propre stock. Sa capacité à stocker les produits commandés par « Le Mas des Agriculteurs

» peut varier au cours de l'année en fonction des autres produits qu'il prévoit de stocker chez lui.

- **Coût de commande** : Le Mas des Agriculteurs a un coût de passation de commande auprès de chaque petit exploitant.
- **Prix unitaire** : Chaque petit exploitant a son propre prix unitaire de vente.
- **Coût unitaire de modification** : Chaque petit exploitant a son propre coût unitaire de modification, un coût additionnel que « Le Mas des Agriculteurs » doit payer en plus du prix unitaire s'il décide d'ajouter des quantités aux commandes déjà passées.

Dans ce travail préliminaire, nous intégrons l'approche de l'horizon glissant pour aider le supermarché à planifier en continu ses approvisionnements.

Dans la littérature scientifique, de nombreux problèmes d'optimisation dans le domaine du génie industriel impliquent la planification d'actions sur plusieurs périodes. Par exemple, dans ce travail, il est nécessaire de planifier les commandes pour chaque mois de l'année et sur plusieurs années. La durée pour laquelle les décisions doivent être prises est appelée l'horizon de planification (Swamidass, 2000). Cependant, lorsque l'horizon de planification devient trop long, le problème d'optimisation devient trop complexe à résoudre. Cela se produit également lorsque l'avenir est incertain, c'est-à-dire lorsque la demande les dix prochaines années est inconnue, ce qui rend la prévision de l'avenir une activité coûteuse (Sethi & Sorger, 1991).

L'horizon glissant est une méthode permettant de surmonter les longues périodes de planification et les paramètres futurs inconnus. Cette méthode divise l'horizon de planification en étapes temporelles, puis se concentre sur la prise de décision pour le sous-ensemble des étapes temporelles les plus proches, appelé la « fenêtre glissante ».

Une fois qu'un certain temps s'est écoulé, la fenêtre glissante « glisse » vers le prochain ensemble d'étapes temporelles. Dans certains scénarios, la notion de « périodes figées » est ajoutée à la planification par horizon glissant, période durant laquelle les décisions ne peuvent pas être modifiées. Ces périodes se situent généralement entre le moment présent et les périodes de la fenêtre glissante, offrant ainsi une certaine stabilité à la solution lorsque de nouvelles informations sont ajoutées au système. Dans ce travail, les périodes figées permettent de laisser suffisamment de temps aux agriculteurs pour planter et cultiver leurs produits.

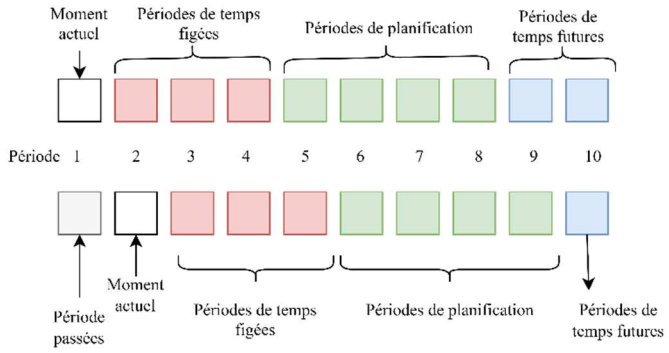


Figure 1. Représentation de l'horizon glissant pour notre cas d'étude

La ***Figure 1*** illustre cette procédure pour le cas du Mas des Agriculteurs. Dans ce scénario, au mois w, l'horizon de planification commence à $w + 6$ et s'étend jusqu'au mois $w + 12$. Cela permet au modèle de passer de nouvelles commandes jusqu'à un an à l'avance et ne lui permet pas de modifier l'ordre pour les six prochains mois afin de respecter la contrainte imposée par les agriculteurs.

Le reste de ce travail est structuré comme suit : dans la Section 2, nous passons en revue certaines approches de choix de fournisseurs. Dans la Section 3, nous décrivons l'approche de modélisation proposée. Dans la Section 4, nous présentons notre cas d'étude. Enfin, nous donnons quelques conclusions et perspectives dans la Section 5.

2 REVUE DE LA LITTERATURE

Les problèmes de choix de fournisseurs et d'allocation des commandes sont largement abordés dans le domaine de la recherche opérationnelle. De nombreux techniques ont été développées pour aider les détaillants à résoudre ce problème, telles que la programmation linéaire (Bettayeb et al., 2021; Dimyati, 2020; Modibbo et al., 2022), la programmation non linéaire (Esmaeili-Najafabadi et al., 2021; Lamba & Singh, 2019; Yousefi et al., 2021), et d'autres techniques de résolution (Alejo-Reyes et al., 2020; Aouadni et al., 2019; Thevenin et al., 2022). Cependant, peu de travaux ont intégré une planification en horizon glissant dans leur modélisation. Nous citons certains de ces travaux ci-dessous.

Mateo-Fornés et al. (2023) se sont concentrés sur la gestion de stocks des produits frais. Ils ont modélisé le stockage de différentes variétés de pommes et types de stockage frigorifique, en intégrant l'incertitude liée au taux de transformation des fruits frais en fruits déshydratés. Leur objectif était de minimiser différents coûts, tels que les coûts de transport et de stockage. Ils ont développé un modèle de programmation stochastique à deux étapes qui aide d'abord à la sélection des fruits achetés auprès de différents producteurs, puis à la prise de décisions concernant le stockage. Leur modèle a permis de réduire les coûts de 6,4% en moyenne.

Noh & Hwang, (2023) ont abordé la gestion de la chaîne d'approvisionnement en énergie, confrontée à deux défis : le renforcement des réglementations environnementales et les diverses incertitudes causées par différents facteurs. Le travail se concentre sur une centrale électrique et plusieurs fournisseurs de combustibles fossiles, tout en prenant en compte des demandes d'énergie incertaines. Pour ce faire, les auteurs ont développé un programme linéaire mixte en nombres entiers pour planifier en horizon glissant et aider à choisir le fournisseur de combustibles fossiles sous incertitude. Ils ont effectué une analyse de sensibilité, qui a montré l'efficacité de leur méthode face à l'incertitude, ainsi qu'un bon compromis entre les coûts et la durabilité de ce secteur.

Badejo & Ierapetritou, (2023) ont modélisé un réseau de chaîne d'approvisionnement à quatre niveaux sous forme de graphe dirigé. Leur travail minimise les coûts tout en prenant en compte l'incertitude des perturbations et de la demande. Pour ce faire, les auteurs ont développé un modèle stochastique à deux étapes intégrant des modèles de programmation mixte en nombres entiers et l'ont testé sous un horizon glissant. Leur modèle arrive à maitriser les perturbations introduites dans le système.

Bien que des chercheurs utilisant diverses méthodes et dans différents domaines aient abordé les problèmes de choix de fournisseurs et d'allocation des commandes, aucun travail n'a été développé pour résoudre ce problème pour les détaillants agro-

alimentaires spécialisés dans les approvisionnements auprès des petits exploitants locaux tout en intégrant l'approche de l'horizon glissant.

3 APPROCHE DE RESOLUTION

Ce travail préliminaire s'appuie sur le modèle développé dans Germanos et al., (2023b), dans lequel nous modélisons de manière plus précise le fonctionnement du Mas des Agriculteurs en intégrant l'approche de l'horizon glissant dans la planification.

Dans cette modélisation, nous suivons une politique de choix de fournisseur où chaque fournisseur, appelé par la suite producteur, dispose de sa capacité de production dynamique et de sa politique de prix. Chacun d'entre eux a également une capacité de stockage dynamique avec ses propres coûts unitaires de stockage, permettant aux commandes d'être stockées chez lui jusqu'à la date de livraison prévue. Il a aussi son propre « coût de changement unitaire », un coût supplémentaire que « Le Mas des Agriculteurs » doit prendre en charge s'il modifie une commande précédemment convenue. Par ailleurs, le modèle ne permet pas de report de commande. C'est-à-dire une demande n'est pas perdue et reste dans le système jusqu'à qu'elle soit entièrement satisfaite.

Tableau 1 Notations

Paramètres	
$\mathcal{W}$	Horizon de planification
$\mathcal{S}$	Ensemble des petits producteurs
w	Indice des petits producteurs, $s \in \mathcal{S}$
s	Indice de la période, $w \in \mathcal{W}$
d_w	Demande mensuelle connue
p_s	Prix unitaire de vente du petit producteur s
o_s	Coût de commande du petit producteur s
h_w^s	Coût unitaire de stockage du petit producteur s à la période w
λ_w^s	Coût de changement unitaire du petit producteur s à la période w
c_w^s	Capacité de production du petit producteur s à la période w
i_w^s	Capacité de stockage du petit producteur s à la période w
Q_w^s	Quantité totale précédemment planifiée à commander au petit producteur s à la période w
M	Grand M
Variables	
$D_w'^s$	Variable de décision entière qui indique la quantité livrée par le petit producteur s à la fin de la période w
$Q_w'^s$	Variable de décision entière qui donne la quantité totale à commander au petit producteur s à la période w
$I_w'^s$	Niveau de stock du petit producteur s à la fin de la période w
δ_w^s	Changement dans la quantité commandée du petit producteur s à la période w, entre la quantité précédemment commandée Q_w^s et la mise à jour $Q_w'^s$
Y_w^s	Variable binaire qui indique si une commande a été passée auprès du petit producteur s à la période w

Le programme linéaire suivant modélise le problème étudié. Il utilise la notation introduite dans le tableau **Tableau 1**.

$$CT: min \sum_{s \in S} \sum_{w \in W} (o_s . Y_w^s + p_s . Q_w'^s + \lambda_w^s . \delta_w^s + h_w^s I_w'^s) \quad (1)$$

Sous les contraintes :

$$I_w'^s \geq I_{w-1}^s + (Q_w'^s - D_w'^s) \qquad \forall s \in \mathcal{S}, \forall w \in \mathcal{W} \quad (2)$$

$$\sum_{s \in \mathcal{S}} D_w'^s \geq d_w \qquad \forall w \in \mathcal{W} \quad (3)$$

$$I_w'^s \leq i_w^s \qquad \forall s \in \mathcal{S}, \forall w \in \mathcal{W} \quad (4)$$

$$Q_w'^s \leq c_w^s \qquad \forall s \in \mathcal{S}, \forall w \in \mathcal{W} \quad (5)$$

$$Q_w'^s \geq Q_w^s \qquad \forall s \in \mathcal{S}, \forall w \in \mathcal{W} \quad (6)$$

$$\delta_w^s \geq Q_w'^s - Q_w^s \qquad \forall s \in \mathcal{S}, \forall w \in \mathcal{W} \quad (7)$$

$$Q_w'^s \leq M . Y_w^s \qquad \forall s \in \mathcal{S}, \forall w \in \mathcal{W} \quad (8)$$

$$I_w'^s \geq 0 \qquad \forall s \in \mathcal{S}, \forall w \in \mathcal{W} \quad (9)$$

$$I_w'^{|\mathcal{S}|} = 0 \qquad \forall w \in \mathcal{W} \quad (10)$$

$$Q_w'^s, D_w'^s \geq 0 \qquad \forall s \in \mathcal{S}, \forall w \in \mathcal{W} \quad (11)$$

Dans ce modèle, la fonction objectif (1) minimise les différents coûts (passation de commande, achat, changement et stockage). Les contraintes (2) calculent le niveau de stock à chaque période $w \in \mathcal{W}$ pour tous les producteurs $s \in \mathcal{S}$. Les contraintes (3) garantissent que les quantités livrées par les producteurs satisfont les demandes de chaque période $w \in \mathcal{W}$. Les contraintes (4) garantissent que la capacité de stockage des petits producteurs est respectée à chaque période. Les contraintes (5) garantissent que la capacité de production des petits producteurs est respectée à chaque période. Les contraintes (6) garantissent les quantités de commande précédemment convenues. Les contraintes (7) calculent les quantités qui ont été ajoutées à la commande jusqu'au mois $w + 11$, car le mois $w + 12$ vient d'être ajouté à l'horizon de planification. Les contraintes (8) garantissent la validité des variables binaires Y_w^s. Les contraintes (9) interdisent la rupture, et les contraintes (10) interdisent au dernier producteur, qui est un fournisseur externe, de stocker. Enfin, les contraintes (11) garantissent que les quantités commandées $Q_w'^s$ et livrées $D_w'^s$ restent positives. Cette formulation du problème suit la représentation C/G/C/G (coût de commande constant, coût de stockage variable, coût de production constant et capacités variables) telle qu'expliquée par (Bitran & Yanasse, 1982) et (Brahimi et al., 2006). Cette formulation est une généralisation de la représentation C/G/Z/NI, qui est elle-même un problème NP-difficile. Par conséquent, notre problème étudié est également NP-difficile.

Afin d'intégrer à ce LP l'approche de l'horizon glissant, nous implémentons l'***Algorithm 1*** Horizon glissant proposé.

Algorithm 1 Horizon glissant proposé

Require $d_w, p_s, o_s, h_w^s, \lambda_w^s, c_w^s, i_w^s$
for every planning horizon $\in \mathcal{W}$ **do**
    Extract $d_w, h_w^s, \lambda_w^s, c_w^s, i_w^s$ of $\mathcal{W}$
    Optimize $CT(D_w'^s, Q_w'^s)$
    $D_w^s \leftarrow D_w'^s$
End for

Dans un premier temps, l'algorithme prend en compte ce qui a déjà été planifié par « Le Mas des Agriculteurs ». Il génère ensuite une solution pour l'horizon de planification actuel et met à jour les quantités commandées, livrées et stockées pour chaque période, en tenant compte des modifications apportées au plan initial. Ensuite, au cours du mois suivant, l'horizon de planification, les commandes et les coûts sont mis à jour. Ce processus est répété jusqu'à la fin de l'horizon.

4 ÉTUDE DE CAS

Nous évaluons l'efficacité de notre modèle à l'aide d'un ensemble de données « anonymisées » proposées par le « Le

Mas des Agriculteurs ». Le scénario implique quatre producteurs dont le quatrième représente le fournisseur externe ayant une capacité de production infinie mais sans possibilité de stockage.

Le ***Tableau 2*** détaille les coûts d'achat et de passation de commande des producteurs. ***Tableau 3*** présente les coûts de stockage unitaires des producteurs et ***Tableau 4*** présente leurs coûts de changement. Le tableau

Tableau 5 répertorie les capacités de production et de stockage des producteurs.

Pour résoudre cette instance, le modèle a été développé en Python, et le solveur pour le programme linéaire (PL) utilisé était CPLEX. Le test a été réalisé avec un processeur Intel(R) Core (TM) i9-12900H de 12e génération et 64 Go de RAM.

Tableau 2 Coût unitaire de vente p_s (en € / Tonne) et coûts de commande o_s (en €) des producteurs

	Coût de vente unitaire	Coût de commande
$s = 1$	150	50
$s = 2$	200	60
$s = 3$	240	65
$s = 4$	350	75

Tableau 3 Coût unitaire de stockage h_w^s (en € / Tonne / période)

Période w	1	2	3	4	5	6	7	8
$s = 1$	20	24	23	21	25	26	20	25
$s = 2$	35	36	32	29	37	32	36	40
$s = 3$	44	45	42	46	41	30	35	34
$s = 4$	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅

Tableau 4 Coût de changement λ_w^s (en € / Tonne / période)

Période w	1	2	3	4	5	6	7	8
$s = 1$	25	32	30	27	28	30	34	25
$s = 2$	32	35	36	32	32	34	35	35
$s = 3$	35	36	34	35	32	36	32	31
$s = 4$	45	52	51	41	36	34	45	52

Tableau 5 Capacité de production c_w^s (en € / Tonne / période) et capacité de stockage i_w^s (en €)

Capacité de production								
Période w	1	2	3	4	5	6	7	8
$s = 1$	25	29	21	15	26	11	12	18
$s = 2$	30	33	29	21	34	41	30	25
$s = 3$	44	45	50	35	37	45	30	25
$s = 4$	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
Capacité de stockage i_w^s								
Période w	1	2	3	4	5	6	7	8
$s = 1$	20	14	12	20	15	17	18	15
$s = 2$	25	24	23	27	19	25	30	32
$s = 3$	12	24	21	28	30	31	20	24
$s = 4$	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅

Le ***Tableau 6*** présente le plan pour les périodes $w = 1$ à $w = 6$. Le ***Tableau 7*** présente le plan pour les périodes $w = 2$ à $w = 7$, et enfin, le ***Tableau 8*** présente la solution pour les périodes $w = 3$ à $w = 8$.

Tableau 6 Solution pour la première fenêtre de planification ($w = 1$ jusqu'à $w = 6$), CT=104 105€

	Période	1	2	3	4	5	6
	Demande d_w	110	95	85	68	70	75
Qté livrée	D_w^1	25	29	21	15	26	11
	D_w^2	30	33	29	21	34	41
	D_w^3	44	33	35	32	10	23
	D_w^4	11					
Qté commandée	Q_w^1	25	29	21	15	26	11
	Q_w^2	30	33	29	21	34	41
	Q_w^3	44	33	35	32	10	23
	Q_w^4	11					
Niveau de stock	I_w^1						
	I_w^2						
	I_w^3						

Tableau 7 Solution pour la deuxième fenêtre de planification (w=2 jusqu'à w=7), CT=120 734€

	Période	2	3	4	5	6	7
	Demande d_w	95	85	68	70	75	150
Quantité livrée	D_w^1	29	21	15	**11**	**9**	29
	D_w^2	33	29	21	**22**	**52**	31
	D_w^3	33	35	32	**37**	**14**	61
	D_w^4						29
Quantité commandée	Q_w^1	29	21	15	26	11	12
	Q_w^2	33	29	21	34	41	30
	Q_w^3	33	35	32	**37**	**45**	30
	Q_w^4						29
Niveau de stock	I_w^1				**15**	**17**	
	I_w^2				**12**	**1**	
	I_w^3					**31**	

Tableau 8 Solution pour la troisième fenêtre de planification (w=3 jusqu'à w=8), CT=125 183€

	Période	3	4	5	6	7	8
	Demande d_w	85	68	70	75	150	100
Quantité livrée	D_w^1	21	15	11	9	29	18
	D_w^2	29	21	22	52	31	25
	D_w^3	35	32	37	14	61	25
	D_w^4					29	32

Quantité commandée	Q_w^1	21	15	26	11	12	18
	Q_w^2	29	21	34	41	30	25
	Q_w^3	35	32	37	45	30	25
	Q_w^4					29	32
Niveau de stock	I_w^1			15	17		
	I_w^2			12	1		
	I_w^3				31		

En examinant la solution proposée par le modèle, nous remarquons qu'il a tendance à mettre à jour davantage les quantités livrées et stockées (Modifié dans ***Tableau 7*** : D_5^1, D_6^1, D_5^2, D_6^2, D_5^3, D_6^3, I_5^1, I_6^1, I_5^2, I_6^1, *et* I_6^3) que les quantités commandées (Modification dans ***Tableau 7*** : Q_5^3 Q_6^3). Cela s'explique par l'absence de pénalité lors de la modification des deux premières quantités, contrairement au coût de changement appliqué lorsque la quantité commandée est modifiée.

On peut également noter que le modèle alterne entre le stockage de quantités lorsqu'une forte demande est prévue et la commande auprès du fournisseur externe lorsque la demande est trop importante pour être satisfaite. Plus précisément, le modèle a commandé auprès du fournisseur 4 lors de la dernière période (***Tableau 8***, $w = 8$), car cela s'avérait moins coûteux que de stocker des quantités importantes auprès des autres producteurs à l'avance.

Dans la partie qui suit, nous détaillons les performances du modèles proposés pour résoudre des problèmes de grande taille. Pour ce faire, nous mesurons le temps d'exécution des instances avec un nombre variable de petits producteurs et plusieurs tailles d'horizon glissant. Nous notons que l'horizon de planification a toujours été fixé à 6 périodes. Pour garantir l'anonymat des données, nous les avons générés aléatoirement suivant une loi uniforme. Pour chaque combinaison, nous avons généré 15 instances. Nous rapportons dans le ***Tableau 9*** les temps minimums, maximums et moyens nécessaires pour résoudre chaque instance.

Tableau 9 Temps d'exécution (en secondes) pour chaque combinaison.

		$\|\mathcal{S}\|$=10	$\|\mathcal{S}\|$=15	$\|\mathcal{S}\|$=20	$\|\mathcal{S}\|$=25
$\|\mathcal{W}\|$=20	Min	0.06	0.11	0.12	0.14
	Mean	0.1	0.14	0.16	0.19
	Max	0.14	0.18	0.21	0.25
$\|\mathcal{W}\|$=30	Min	0.15	0.16	0.25	0.35
	Mean	0.18	0.26	0.32	0.4
	Max	0.24	0.32	0.46	0.47
$\|\mathcal{W}\|$=40	Min	0.19	0.24	0.32	0.37
	Mean	0.24	0.31	0.41	0.45
	Max	0.31	0.38	0.51	0.53
$\|\mathcal{W}\|$=50	Min	0.23	0.34	0.44	0.46
	Mean	0.41	0.46	0.54	0.65
	Max	0.63	0.74	0.61	0.77

Les résultats montrent une augmentation du temps d'exécution lorsque le nombre de petits producteurs augmente, ainsi qu'une augmentation de la longueur totale de l'horizon de planification. Cela n'est pas surprenant, car le programme linéaire doit ajouter davantage de variables et de contraintes pour résoudre des instances incluant un plus grand nombre de petits producteurs, et le modèle doit résoudre un plus grand nombre d'horizons de planification pour des horizons totaux plus longs. Cependant, bien que le temps d'exécution total du modèle augmente avec la complexité de l'instance, il reste dans des limites de temps de calcul acceptables.

5 Conclusion

Dans ce travail, nous abordons le problème de planification des approvisionnements et sélection des producteurs agricoles en horizon glissant. Le modèle proposé considère une demande dynamique ainsi que les contraintes dynamiques des petits producteurs. Le modèle intègre également une approche d'horizon glissant, qui permet des modifications des commandes précédentes passées auprès des petits producteurs afin de satisfaire la demande future avec des coûts minimaux. Le modèle a été testé sur une étude de cas inspirée de données réelles, et a démontré sa capacité à planifier les quantités commandées, les quantités livrées et les stocks tout au long de la période de planification. Les expérimentations montrent que le temps de calcul augmente en fonction du nombre de périodes et de petits producteurs, mais reste dans des limites acceptables. Bien que le modèle développé prenne en compte les capacités et les prix dynamiques des producteurs, ainsi que la demande dynamique, il ne prend pas en compte l'incertitude de certains paramètres. Dans nos travaux futurs, nous allons essayer d'intégrer les incertitudes des rendements et des délais de production dans le modèle afin d'être très proche de la réalité. Notre travail final devra être intégré dans une plateforme qui sera déployer auprès de plusieurs coopératives françaises, espagnoles, italiennes et tunisiennes qui cherchent à maximiser les quantités commandées auprès des producteurs locaux afin de renforcer la notion de « circuits courts ».

6 Remerciements

Ce travail fait partie du projet de recherche intitulé « Modèles intelligents pour les chaînes de valeur locales de l'agroalimentaire basées sur les technologies numériques pour favoriser la résilience et la durabilité face à la COVID-19 » (SMALLDERS) cofinancé par le programme PRIMA - Section 2 Appel multi-thématiques 2021, à travers les autorités nationales suivantes : Ministère des Universités et de la Recherche (MUR, Italie), Agence d'État pour la Recherche (AEI, Espagne), Agence Nationale de la Recherche (ANR, France), Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique (Tunisie).

Les auteurs reconnaissent le financement de la bourse PCI2022132924 par MCIN/AEI/10.13039/501100011033 et le programme « Union Européenne NextGenerationEU/PRTR ».

7 References

Alejo-Reyes, A., Cuevas, E., Rodríguez, A., Mendoza, A., & Olivares-Benitez, E. (2020). An improved grey wolf optimizer for a supplier selection and order quantity allocation problem. *Mathematics*, *8*(9), 1457.

Amamou, A., Sidhom, L., Zouari, A., & Mami, A. (2023). Sustainability-based Multi-capital Approach for the Agri-Food Supply Chain : Research Trends Based on Bibliometric Review. *2023 International Conference*

on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA), 1-6. https://doi.org/10.1109/INISTA59065.2023.10310525

Aouadni, S., Aouadni, I., & Rebai, A. (2019). A systematic review on supplier selection and order allocation problems. *Journal of Industrial Engineering International*. https://doi.org/10.1007/s40092-019-00334-y

Badejo, O., & Ierapetritou, M. (2023). Supply Chain Optimization Considering Disruption Demand Uncertainty. In *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 52, p. 3345-3350). Elsevier.

Bettayeb, B., Ben-Ammar, O., & Dolgui, A. (2021). Multi-period Multi-sourcing Supply Planning with Stochastic Lead-Times, Quantity-Dependent Pricing, and Delivery Flexibility Costs. *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems*, 511-518.

Bitran, G. R., & Yanasse, H. H. (1982). Computational complexity of the capacitated lot size problem. *Management Science*, *28*(10), 1174-1186.

Brahimi, N., Dauzere-Peres, S., Najid, N. M., & Nordli, A. (2006). Single item lot sizing problems. *European Journal of Operational Research*, *168*(1), 1-16.

Cimino, A., Coniglio, I. M., Corvello, V., Longo, F., Sagawa, J. K., & Solina, V. (2024). Exploring small farmers behavioral intention to adopt digital platforms for sustainable and successful agricultural ecosystems. *Technological Forecasting and Social Change*, *204*, 123436. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123436

Dimyati, T. T. (2020). Integrated model for Multi-criteria Supplier Selection and Order Allocation Problem. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *847*. https://doi.org/10.1088/1757-899X/847/1/012018

Esmaeili-Najafabadi, E., Azad, N., & Nezhad, M. S. F. (2021). Risk-averse supplier selection and order allocation in the centralized supply chains under disruption risks. *Expert Systems with Applications*, *175*, 114691. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114691

Francesco Longo, G. M., & Solina, V. (2024). A simulation model for addressing supply chain disruptions under a multi-capital sustainability perspective : A case study in the agri-food sector. *Journal of Simulation*, *0*(0), 1-18. https://doi.org/10.1080/17477778.2024.2341015

Germanos, M., Ben-Ammar, O., & Zacharewicz, G. (2023a). An asexual genetic algorithm for the smallholders' demand selection problem. *Proceedings of the 9th International Food Operations and Processing Simulation Workshop*. The 9th International Food Operations and Processing Simulation Workshop. https://doi.org/10.46354/i3m.2023.foodops.008

Germanos, M., Ben-Ammar, O., & Zacharewicz, G. (2023b). Small-Producer Selection and Order Allocation in the Agri-Food Supply Chain. *2023 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, 1-6. https://doi.org/10.1109/ICNSC58704.2023.10318981

Lamba, K., & Singh, S. P. (2019). Dynamic supplier selection and lot-sizing problem considering carbon emissions in a big data environment. *Technological Forecasting and Social Change*, *144*, 573-584. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.03.020

Longo, F., Mirabelli, G., & Solina, V. (2024). A simulation model for addressing supply chain disruptions under a multi-capital sustainability perspective : A case study in the agri-food sector. *Journal of Simulation*, 1-18.

Longo, F., Mirabelli, G., Solina, V., Belli, L., Abdallah, C. B., Ben-Ammar, O., Bottani, E., García-Gallego, J. M., Germanos, M., González, F. J. M., Lacoba, S. R., Sidhom, L., Vignali, G., & Zacharewicz, G. (2023). An overview of approaches and methodologies for supporting smallholders : ICT tools, blockchain, business models, sustainability indicators, simulation models. *Procedia Computer Science*, *217*, 1930-1939. https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.393

Mallek-Daclin, S., El-Kassis, M., Daclin, N., & Zacharewicz, G. (2024, mai). A BPMN-based approach to support smallholders' Business Model Simulation. *2024 Annual Modeling and Simulation Conference (ANNSIM)*.

Mateo-Fornés, J., Soto-Silva, W., González-Araya, M. C., Plà-Aragonès, L. M., & Solsona-Tehas, F. (2023). Managing quality, supplier selection, and cold-storage contracts in agrifood supply chain through stochastic optimization. *International Transactions in Operational Research*, *30*(4), 1901-1930.

Miranda, F. J., García-Gallego, J. M., Chamorro-Mera, A., Valero-Amaro, V., & Rubio, S. (2023). A systematic review of the literature on agri-food business models : Critical review and research agenda. *British Food Journal*, *125*(12), 4498-4517. https://doi.org/10.1108/BFJ-12-2022-1102

Modibbo, U. M., Hassan, M., Ahmed, A., & Ali, I. (2022). Multi-criteria decision analysis for pharmaceutical supplier selection problem using fuzzyTOPSIS. *Management Decision*. https://doi.org/10.1108/md-10-2020-1335

Naqvi, M. A., & Amin, S. H. (2021). Supplier selection and order allocation : A literature review. *Journal of Data, Information and Management*, *3*(2), 125-139.

Noh, J., & Hwang, S.-J. (2023). Optimization Model for the Energy Supply Chain Management Problem of Supplier Selection in Emergency Procurement. *Systems*, *11*(1), 48.

Sethi, S., & Sorger, G. (1991). A theory of rolling horizon decision making. *Annals of Operations Research*, *29*(1), 387-415.

Stefanini, R., Preite, L., Bottani, E., Belli, L., Davoli, L., Ferrari, G., Vignali, G., & others. (2023). Selection of 4.0 sensors for small holders : The compromise between the advantages and the costs of the implementation. *Proceedings of the 9th International Food Operations and Processing Simulation Workshop (FoodOPS 2023)*.

Swamidass, P. M. (Éd.). (2000). *Encyclopedia of production and manufacturing management*. Kluwer Academic.

Thevenin, S., Ben-Ammar, O., & Brahimi, N. (2022). Robust optimization approaches for purchase planning with supplier selection under lead time uncertainty. *European Journal of Operational Research*, *303*(3), 1199-1215. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.03.029

Yousefi, S., Jahangoshai Rezaee, M., & Solimanpur, M. (2021). Supplier selection and order allocation using two-stage hybrid supply chain model and game-based order price. *Operational Research*, *21*, 553-588.

Dual Sourcing and Inventory Control Enhanced by Machine Learning-Driven Demand Forecasting

AMEL BEN MABROUK[1,2], AMIRA BEN MABROUK[3], MOHAMED SALAH AGUIR[4], ANIS CHELBI[1.2]

1 RIFTSI LABORATORY LR20ES02, NATIONAL HIGHER ENGINEERING SCHOOL OF TUNIS, UNIVERSITY OF TUNIS
2 MEDITERRANEAN SCHOOL OF BUSINESS, SOUTH MEDITERRANEAN UNIVERSITY, TUNIS, 1053, TUNISIA

3 LIMTIC LABORATORY, HIGHER INSTITUTE OF COMPUTER, UNIVERSITY OF TUNIS EL MANAR, ARYANAH, 2080, TUNISIA
4 NATIONAL ENGINEERING SCHOOL OF CARTHAGE, UNIVERSITY OF CARTHAGE, CHARGUIA II 2035, TUNISIA

* CORRESPONDENCE: amel.benmabrouk@msb.tn

***Abstract* – This paper examines the procurement strategy that integrates dual sourcing and periodic review policy for inventory control. In fact, the order-up-to-level and the reorder interval are considered as decision variables aimed at minimizing the average total cost per time unit. The first supplier is characterized as a potentially unreliable but cost-effective option. Reliability is conceptualized through alternating "on" and "off" periods. During "on" periods, supplier 1 can fulfil orders fully or partially with a random fraction *p*. In contrast, supplier 2 is fully reliable (100%) but offers higher prices than supplier 1. To increase the level of accuracy of forecasts, machine learning (ML) algorithm is implemented by the retailer. A mathematical model is developed to calculate the average total cost per time unit. This cost incorporates factors such as supplier reliability, random fraction of supplier 1, stock-out costs, holding costs, and ordering and purchasing costs from each supplier. A numerical solving procedure is developed to determine the optimal values of the two decision variables for any given problem instance. Finally, a numerical example and the corresponding obtained results are presented, and a sensitivity analysis is performed to demonstrate the consistency and robustness of the proposed model.**

***Keywords* – dual sourcing, supplier's reliability, cost efficiency, Random Forest Regressor, Machine learning.**

1 INTRODUCTION

Recently, researchers have placed growing attention on supply chain risk and disruption management. Several factors, including the COVID-19 pandemic, natural disasters, and security threats, can cause supply disruptions. In recent years, disruption risks [Gupta and Chutani, 2019] have had negative effects on the ability of suppliers to fulfill the orders placed by retailers, leading to significant financial losses and damage to a company's reputation [Yan et al., 2019]. These risks are typically measured by the supplier's reliability, which is a main source of uncertainty in a supply chain [Mahnam et al, 2009]. In procurement, reliability is defined as the ability of a supplier to deliver the required amount when needed [Dada et al., 2007]. Supplier unreliability is modeled as alternating ''available'' (on) and ''unavailable'' (off) periods, indicating when the supplier is, or is not, available to fulfill an order from a buyer [Mohebbi, 2004].

Among the strategies to mitigate disruption risks, dual sourcing has proven effective [Iakovou et al., 2014; He et al., 2015; Mukherjee and Sarin, 2017]. With this approach, the buyer (retailer) sourcing from two suppliers, with different characteristics in terms of market share, price, reliability, or other factors [Tomlin and Wang, 2005]. The retailer adopts dual sourcing as a strategy to enhance efficiency [Boute and Van Mieghem, 2015] and diversify its supply sources by obtaining similar products from another supplier. This reduces the risk of dependency on a single supplier to control the delivery of the required products.

According to [Montanari et al., 2017], supplier 1 offers lower prices but is less reliable due to frequent interruptions, while supplier 2 provides higher reliability with advanced technology, but at a higher price. The retailer must balance cost against reliability when making the decision.

According to the research of [Svoboda et al., 2021], an increasing number of articles on multiple sources have been published since the 1960s, emphasizing the growing academic focus on dual sourcing.

[Yan et al., 2019] studied inventory and order strategies in a two-echelon supply chain with unreliable suppliers facing random disruptions, focusing on a single selling period. In order to satisfy a deterministic time-varying demand, [Deligiannis et al., 2023] developed a model of a company that supplies non-storable substitute products from two suppliers: one that is reliable but expensive, and the other that is unreliable but inexpensive. They discussed extensions to random demand following a Lognormal distribution.

[Montanari et al., 2017] focused on simulation to study the differences between the single sourcing and dual sourcing within the context of the Economic Order Interval (EOI) system of inventory management. Using the Economic Order Interval policy (Figure 1), inventory levels are checked periodically (e.g. weekly or monthly). Every time the inventory is inspected, an order is placed to restore stock to a target level after a lead time L (which represents the time expected for the order to be treated, shipped, and received).The goal of their work was to identify the optimal period between subsequent orders T, aiming to minimize total inventory costs by balancing order and holding costs.

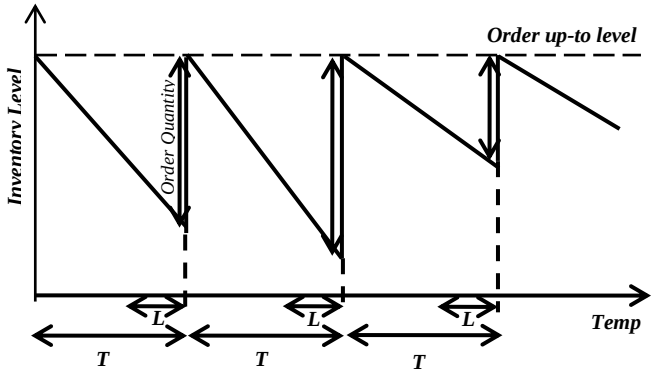


Figure 1. EOI policy

Despite its practical use, especially by grocery retailers [Chen and Disney, 2007], the EOI policy is less studied due to the difficulty of predicting order quantities in uncertain environments (such as fluctuating consumer preferences, economic disruptions, or supply chain instability). This uncertainty can lead to significant risks in supply chain management (Overstocking or Understocking). To mitigate these risks, accurate market demand forecasting is critical.

Traditional forecasting methods have proven inadequate in addressing the dynamic and complex nature of consumer demand. These methods often fail to take into account factors such as seasonality and promotions, leading to overstocking or stockouts [Amosu et al., 2024]. Artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) algorithms offer several advantages compared to traditional methods. These models can continuously learn from new data and improve their accuracy over time. They can incorporate multiple external factors (inflation rates, weather conditions, or events such as holidays, promotions, etc.) into their predictions that influence consumer purchasing behavior. By considering these variables, the retailer can create more dynamic forecasts that better reflect real-world scenarios.

Our paper is principally motivated by the work of [Montanari et al., 2017]. However, it brings a new perspective on supplier reliability. The latter is modeled in terms of *on*/*off* periods. No orders will be made to supplier 1 during the "off" periods. During the "on" periods, supplier 1 will deliver a random fraction, denoted by p, of the ordered quantity. In other words, the supplier's delivery is uncertain and may not always fulfill the entire order. The delivered quantity is a fraction p of the original order, which is influenced by factors such as quality issues, damage in transit, rounding by the supplier, etc. [Deligiannis et al., 2023]. Thus, the goal of this paper is to minimize the average total cost per time unit by optimizing the EOI policy parameters, specifically the Order Up to Level and the Reorder Interval. We use machine learning, particularly the Random Forest Regressor (RFR), to help retailers predict customer demand more accurately. RFR is a powerful machine learning algorithm used for predicting continuous values [Tanizaki et al., 2020; Adetunji et al., 2022; Rohaan et al., 2022].

To the best of our knowledge, there is no reported research that combines the Random Forest Regressor (RFR) method and dual sourcing model.

The layout of the remainder of the paper is organized as follows. The next section presents the proposed strategy and the working assumptions. In Section 3, a mathematical model is presented, and a numerical algorithm is proposed to determine the optimal values of the decision variables for any given problem instance. A numerical example and a sensitivity analysis are provided in Section 4. Finally, conclusions and future research directions are provided in the last section.

Throughout the paper, the following notation will be adopted (All periods are given in time units):

r	Probability that supplier 1 is found in period 'on' when the order is issued by the retailer
L_i	Procurement lead time of supplier i (i = 1, 2)
$I(0)$	Initial inventory level
S	Order-up-to level of inventory
T	Reorder interval
d	Market demand
Q_{out}	Quantity of out-of-stock product
Q_i	Quantity delivered by supplier i (i = 1, 2)
n_i	Number of orders from supplier i (i = 1, 2)
c_h	Unitary holding cost
c_{so}	Unitary stock-out cost
co_i	Unitary cost of order and transport from supplier i (i = 1, 2)
c_p	Unitary purchasing cost of the product
$\%\Delta c_p$	Percentage increase in the cost of the product when selecting the second supplier
N	Considered time horizon [time unit]
p	Proportion of order quantity the supplier can fulfill
Smax	Limit of the storage capacity
ΔT	Increment value for the reorder interval
ΔS	Increment value for Order-up-to level of inventory
O	Maximum number of orders during the considered working interval
TC	Average total cost per time unit
$C_{stock\text{-}out}$	Average stock-out cost
C_{stock}	Average holding cost
$C_{order,i}$	Cost of order from supplier i (i =1, 2)
$C_{\Delta purchase}$	Average purchasing cost

2 STRATEGY DEFINITION

In this paper, we consider a dual-sourcing model involving a final customer, a retailer, and two suppliers. Using the EOI policy, at fixed periodic intervals, the retailer buys most of its products from the first supplier, which is competitively priced but has a history of delivery failures and is therefore somewhat unreliable. These issues are becoming more frequent and are a common occurrence in today's supply chains. The retailer resorts to the second supplier only when the first fails to deliver the required quantity of products by the given deadline. The second supplier, known for its reliability despite higher costs, guarantees a stable supply, ensuring timely and defect-free deliveries. We consider supplier 1 as a highly risky supplier with varying reliability which is noted by r. Here, reliability is quantized in terms of the sequence of "on" and "off" modes.

During "off" periods no orders can be placed to supplier 1. The latter can deliver a proportion p of the quantity ordered during "on" periods. Supplier 2 is contacted to supply the remaining quantity. Without loss of generality, we assume that deliveries are made on time, and that the retailer fulfills customer requests immediately.

The retailer must guarantee an acceptable service level for customers while minimizing its average total cost per time unit, which includes ordering costs, holding costs, purchasing costs, and any costs incurred from stockouts if supplier 1 does not meet its supply commitment.

The goal is to minimize the average total cost per time unit by determining the best combination of EOI policy parameters (Order Up to Level S and Lead Time T). By assessing these parameters, the retailer will be able to make the right decisions in compromising between costs and reliability while handling the orders between two different suppliers.

3 THE MATHEMATICAL MODEL

In this paper, we use the Random Forest Regressor (RFR) to forecast the demand d. This technique combines n decision trees to improve prediction accuracy. Each decision tree in the random forest is trained on a random subset of the data and features, and the final demand prediction d is computed by averaging the predictions from all n trees, as shown below [Breiman, 2001]:

$$d = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} d_j \quad (1)$$

where d_j represents the predicted demand value of j^{th} tree (j = 1, 2, …, n).

Every time t ($t = \alpha T$, α = 1, 2, ….), the retailer faces the demand $d(t)$ from the final customer. The retailer will first check the inventory:

- If $d(t) \leq I(t-1)$, means that the available inventory can meet the demand. The inventory will be updated in the following way:

$$I(t) = I(t\text{-}1) - d(t) \quad (2)$$

- If $d(t) > I(t-1)$, means that we have a stock disruption.

The shortage quantity is obtained by the following equation:

$$Q_{out}(t) = d(t) - I(t-1) \quad (3)$$

The retailer will place orders every T units of time. In this case, we have two situations:

- If the first supplier is not able to fulfill the order ($Q_1(t) = 0$), the same quantity will be ordered from the second supplier. The latter will always be able to fulfill the order and ship the product to the retailer.

$$Q_2(t) = S - I(t) \quad (4)$$

- If the first supplier can only fulfill a proportion p of the order, the part $(1-p)$ will be ordered from the second supplier.

The quantity delivered by the first supplier at time t ($t = \alpha T$, $\alpha = 1, 2, \ldots$) is given by:

$$Q_1(t) = p*(S - I(t)) \quad (5)$$

The quantity delivered by the second supplier at time t ($t = \alpha T$, $\alpha = 1, 2, \ldots$) is expressed as follows:

$$Q_2(t) = (1-p)*(S - I(t)) \quad (6)$$

$Q_1(t)$ and $Q_2(t)$ will be available at the retailer after L_i (i = 1, 2) and they will restore the inventory level to S.

The inventory will be updated as follows:

$$I(t) = I(t-1) - d(t) + Q_1(t-L_1) + Q_2(t-L_2) \quad (7)$$

Our goal is to determine the optimal values S* and T* that minimize the retailer's average total cost per time unit TC. This cost is computed by the sum of stock-out costs, holding costs, and purchasing and ordering costs from each supplier.

3.1 The average stock-out cost

$C_{stock\text{-}out}$ is given by the following expression:

$$C_{stock\text{-}out} = \frac{\sum_{t=1}^{N} Q_{out}(t)*c_{so}}{N} \quad (8)$$

As seen in equation 8, the average stock-out cost is considered even with the perfect reliability of supplier 2. This is because stock-outs can result not only from supplier reliability but also from demand variability.

3.2 The average holding cost per time unit

C_{stock} includes costs related to storage space, insurance, taxes, deterioration, etc.

It is given by:

$$C_{stock} = \frac{\sum_{t=1}^{N} I(t)*c_h}{N} \quad (9)$$

3.3 The cost of order per time unit

$C_{order,i}$ from supplier i (i =1,2) is calculated as follows:

$$C_{order,i} = \frac{n_i * co_i}{N} \qquad (i = 1, 2) \quad (10)$$

n_i (i=1, 2) will be computed using an algorithm that is shown in figure 2 below.

3.4 The purchasing cost per time unit

The cost difference between suppliers 1 and 2 is calculated using the quantity purchased from supplier 2, the percentage increase in cost, and the product cost at supplier 1 [Montanari et al., 2017]:

$$C_{\Delta purchase} = \frac{\sum_{t=1}^{N} Q_2(t)*\%\Delta C_p*c_p}{N} \quad (11)$$

3.5 The average total cost per time unit TC

Using the equations developed above, the average total cost per time unit can be written in the following way:

$$TC = \frac{\sum_{t=1}^{N} Q_{out}(t)*c_{so}}{N} + \frac{\sum_{t=1}^{N} I(t)*c_h}{N} + \frac{\sum_{i=1}^{2} n_i * co_i}{N} + \frac{\sum_{t=1}^{N} Q_2(t)*\%\Delta C_p*c_p}{N} \quad (12)$$

Based on the above results, an algorithm has been developed (Figure 2). It allows finding, for a given reliability and random fraction of supplier 1, the optimal combination of the EOI policy parameters (the Order-up-to level of inventory S*, and the reorder interval T*), that minimizes the average total cost per time unit (Equation 12).

From a mathematical perspective, the simulation involves generating a random number, *rnd* (0, 1), within the range of 0 to 1. If *rnd* (0, 1) is less than or equal to the reliability r, the first

supplier can fulfill the order with a proportion *p*. If not, supplier 2 may fulfill the order instead.

In the following section, a numerical example is presented to illustrate the use of the proposed model.

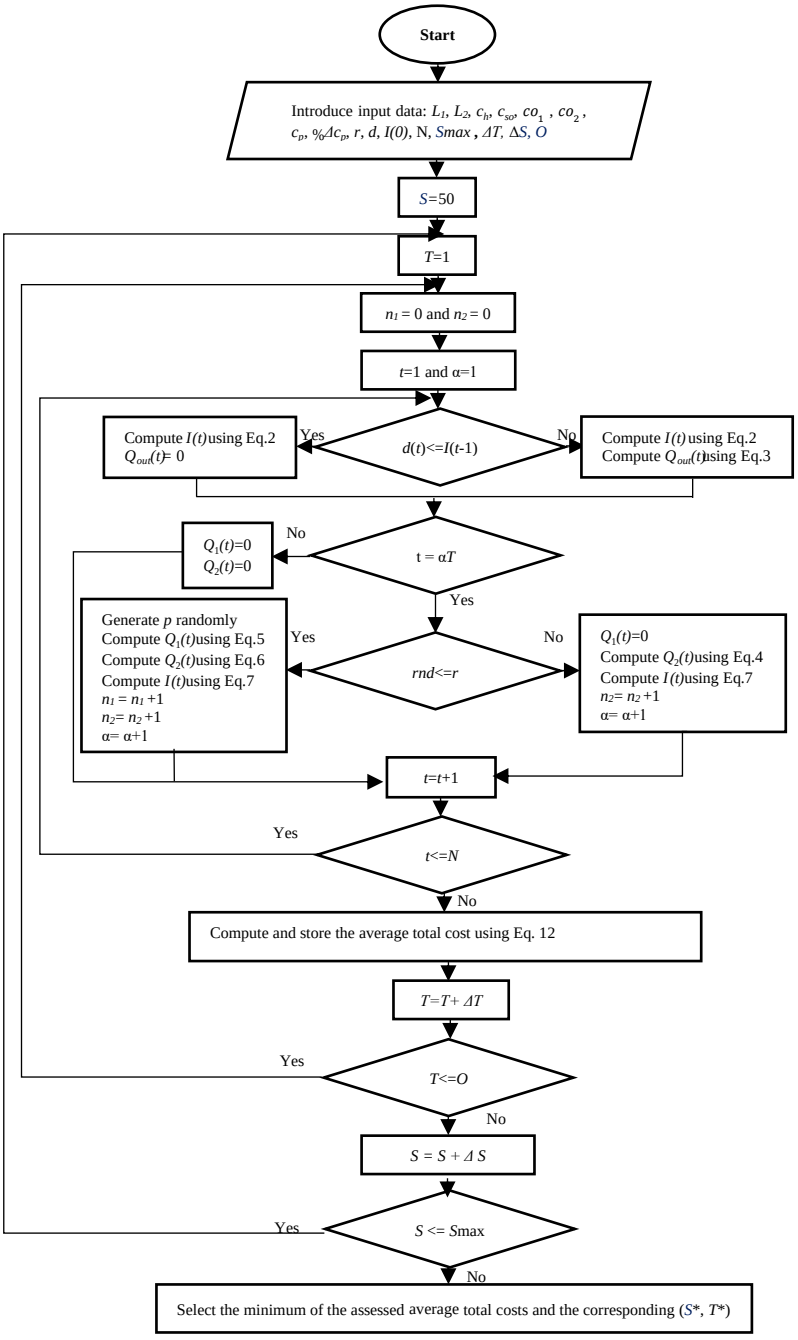


Figure 2. Iterative numerical algorithm to find the optimal strategy

4 RESULTS

Let us consider a retailer which has two suppliers and faces demand forecasted by a Random Forest Regressor (RFR) model. The model considers three external factors randomly determined: 1) weather conditions represented as a binary variable (0 indicates bad weather and 1 indicates good weather); 2) events represented as a binary variable (0 for no event and 1 for an event happening); and 3) the day of the week (with Sunday being 1 and Saturday being 7).

For illustration purposes, the following input data are considered (Table 1).

Table 1. Input data of the simulation

	Supplier 1	Supplier 2
L_i [days]	1	1
c_h [$/unit/day]	0.4	0.4
c_{so} [$/unit/day]	80	80
co_i [$/order]	1500	2000
c_p [$/unit]	320	-
$\%\Delta c_p$	-	8%
r	60%	100%
$I(0)$	250 units	
O	50	
Smax	2000 units	
ΔT	1 day	
ΔS	10 units	
N	300 days	

Table 2 shows a sample of 10 previous actual demands and their corresponding features, that were used to run the Random Forest Regression (RFR) model.

Table 2. The predicted demands

Demand	Weather conditions	Events	The day of the week
282	1	1	3
219	0	1	4
256	1	0	5
186	0	0	6
206	1	1	7
270	1	0	1
218	0	0	2
260	0	1	3
234	1	1	4
202	1	0	5

The optimal combination of T and S which minimizes the average total cost per day has been found. The optimal reorder interval T^* is 3 days and the optimal Order-up-to level of inventory S^* is equal to 1330 units. The corresponding minimum average total cost per day is equal to $5693.2/day. Table 3 shows the components of the optimal average total cost per time unit.

Table 3. The various components of the average total cost per day ($)

C_{stock}	C_{order}	$C_{stock\text{-}out}$	$C_{\Delta purchase}$
371.2	946.7	237.9	4137.4

Below is a numerical analysis showing how changing a few key input parameters affects the optimal solution.

4.1 Effect of reliability r on the optimal strategy

Keeping all other parameters at their initial values, we examined the impact of varying r (more or less reliable supplier). A less reliable supplier raises the risk of stockouts, incurring additional costs. To manage this, the retailer tends to increase order frequency and remain cautious with inventory levels. Looking at Figure 3, in case r increases, the best strategy proposes reducing the frequency of orders (longer intervals) and maintaining more inventory (increasing S), ultimately lowering the average total cost. With higher supplier reliability, the

retailer can carry more stock without worrying about significant delays or shortages in supply.

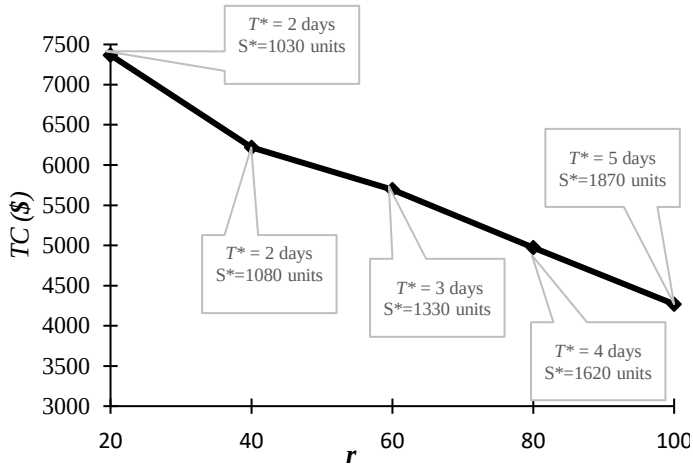


Figure 3. Effect of the variation of the reliability *r* on the optimal strategy

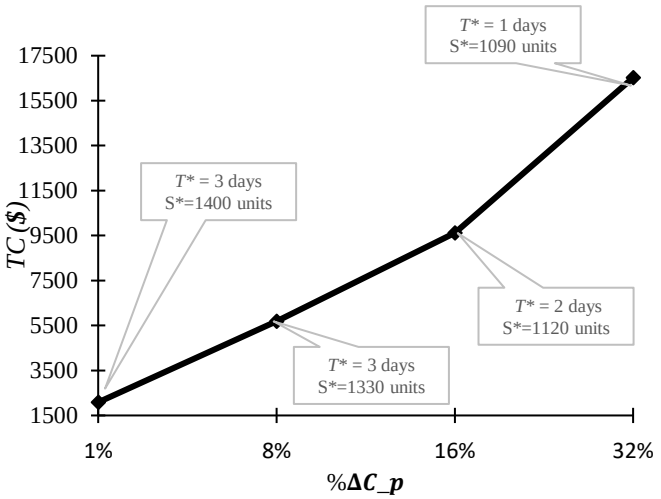


Figure 4. Effect of the change in percentage of purchasing cost increase on the optimal strategy

4.2 Effect of the order ratio (c_{O_2} / c_{O_1}) on the optimal strategy

It is observed in Table 4 below that when the order ratio decreases (from 3 to 0.75), the average total cost per day drops.

Table 4. Effect of the variation of the order ratio (c_{O_2} / c_{O_1}) on the optimal strategy

Order ratio (c_{O_2} / c_{O_1})	Average total cost per day ($/day)	T^* (days)	S^* (units)
3	6055.6	4	1770
1.33	5693.2	3	1330
1	5540.1	2	1050
0.75	5440.9	2	1010

As the ratio decreases, the average total cost per day decreases slightly. When the ratio is higher (higher order cost from supplier 2), the retailer relies more on supplier 1 and holds larger stock levels to mitigate supplier 1's unreliability. However, as the order ratio decreases, the retailer shifts towards supplier 2, benefiting from its perfect reliability, which reduces the risk of stockouts and allows for lower inventory levels.

4.3 Effect of percentage of purchasing cost increase $\%\Delta C_p$ on the optimal strategy

The increasing of $\%\Delta C_p$ have had a significant financial impact as shown in Figure 4. As the purchasing costs increase (from 1% to 32%), the average total cost per day increases significantly. The most important driver of this increase is the higher expenses associated with acquiring inventory, which directly affects the average total cost. The retailer, seeking to mitigate such increased costs, adjusts the ordering strategy to smaller quantities and greater frequency of inventory purchases (decrease of S^* and T^*).

5 CONCLUSIONS

In this work, we developed a dual sourcing model where two different suppliers are available, and the retailer must decide when and how much to order from each supplier. Our paper offered useful insights for practical application to the current circumstances faced by practitioners in the procurement field focusing on the development of successful purchasing strategies in their organizations. Also, the study directly connected the double sourcing to a particular reorder policy such as EOI policy. The Random Forest Regressor (RFR) was employed to predict the demand integrating features such as weather conditions, events, and the day of the week.

However, we acknowledge that there are some limitations to this study that deserve mention. Indeed, we considered a single product and two suppliers. We are currently extending the adopted approach to situations that involve multiple products and multiple suppliers with different reliability indices. We are also working on investigating the impact of the supply capacity limitation on sourcing strategy design in a separate paper.

REFERENCES

Amosu, O. R., Kumar, P., Ogunsuji, Y. M., Oni, S., & Faworaja, O. (2024). AI driven demand forecasting: Enhancing inventory management and customer satisfaction. *World Journal of Advanced Research and Reviews, 23*(2), 708–719. https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.23.2.2394

Adetunji, A. B., Akande, O. N., Ajala, F. A., Oyewo, O., Akande, Y. F., & Oluwadara, G. (2022). House price prediction using random forest machine learning technique. *Procedia Computer Science, 199*, 806–813. https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.100

Boute, R. N., & Van Mieghem, J. A. (2015). Global dual sourcing and order smoothing: The impact of capacity and lead times. *Management Science, 61*(9), 2080-2099. https://doi.org/10.1287/mnsc.2014.1992

Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning, 45*(1), 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

Chen, Y. F., & Disney, S. M. (2007). The myopic order-up-to policy with a proportional feedback controller. *International Journal of Production Research, 45*(1), 351–368. https://doi.org/ 10.1080/00207540600579532

Dada, M., Petruzzi, N. C., & Schwarz, L. B. (2007). A newsvendor's procurement problem when suppliers are unreliable. *Manufacturing & Service Operations Management, 9*(1), 9–32. http://dx.doi.org/10.1287/msom.1060.0128

Deligiannis, M., Liberopoulos, G., & Pandelis, D. G. (2023). Managing supply chain risks with dual sourcing: Bayesian learning of censored supply capacity. *International Journal of Production Economics, 265*, 109002. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.109002

Gupta, V., & Ivanov, D. (2019). Dual sourcing under supply disruption with risk-averse suppliers in the sharing economy. *International Journal of Production Research, 58*(1), 291–307. https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1686189

He, B., Huang, H., & Yuan, K. (2015). The comparison of two procurement strategies in the presence of supply disruption. *Computers & Industrial Engineering, 85*, 296–305. https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.03.019

Iakovou, E., Vlachos, D., Keramydas, C., & Partsch, D. (2014). Dual sourcing for mitigating humanitarian supply chain disruptions. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management, 4*(2), 245–264. https://doi.org/10.1108/jhlscm-03-2013-0008

Mahnam, M., Yadollahpour, M. R., Famil-Dardashti, V., & Hejazi, S. R. (2009). Supply chain modeling in uncertain environment with bi-objective approach. *Computers & Industrial Engineering, 56*(4), 1535–1544. https://doi.org/10.1016/j.cie.2008.09.038

Montanari, R., Bottani, E., Shekarian, E., & Kazemi, N. (2017). A model for the analysis of procurement strategies in the economic order interval environment. *Mathematics and Computers in Simulation, 134*, 79–98. https://doi.org/10.1016/j.matcom.2016.10.007

Mohebbi, E. (2004). A replenishment model for the supply-uncertainty problem. *International Journal of Production Economics, 87*(1), 25–37. https://doi.org/10.1016/S0925-5273(03)00098-7

Mukherjee, N., & Sarin, S. C. (2017). Comparison of single sourcing (with lot streaming) and dual sourcing. *Journal of the Operational Research Society, 69*(11), 1701–1710. https://doi.org/10.1080/01605682.2017.1404182

Rohaan, D., Topan, E., & Groothuis-Oudshoorn, C. G. M. (2022). Using supervised machine learning for B2B sales forecasting: A case study of spare parts sales forecasting at an after-sales service provider. *Expert Systems with Applications, 188*, 115925. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115925

Svoboda, J., Minner, S., & Yao, M. (2021). Typology and literature review on multiple supplier inventory control models. *European Journal of Operational Research, 293*(1), 1–23. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.11.023

Tanizaki, T., Hoshino, T., Shimmura, T., & Takenaka, T. (2020). Restaurants store management based on demand forecasting. *Procedia CIRP, 88*, 580–583. https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.101

Tomlin, B., & Wang, Y. (2005). On the value of mix flexibility and dual sourcing in unreliable newsvendor networks. *Manufacturing & Service Operations Management, 7*(1), 37–57. https://doi.org/10.1287/msom.1040.0063

Yan, R., Kou, D., & Lu, B. (2019). Optimal order policies for dual-sourcing supply chains under random supply disruption. *Sustainability, 11*(3), 698. https://doi.org/10.3390/su11030698

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Short-term forecast of inbound order volumes in an industrial logistics warehouse: a comparison of traditional techniques and machine learning

MARYAM ESMAEILI-QESHLAQI[1,2], ZAKARIA YAHOUNI[1], GÜLGÜN ALPAN[1], MAHDI MOVAHEDKHAH[2]

[1] UNIV. GRENOBLE ALPES, CNRS, GRENOBLE INP, G-SCOP, 38000 GRENOBLE, FRANCE
maryam.esmaeiliqeshlaqi@grenoble-inp.fr, zakaria.yahouni@grenoble-inp.fr, gulgun.alpan@grenoble-inp.fr

[2] DAHER, Log'In/D.E.S Engineering Services, 7 avenue de l'Union, 94390 Orly, France
m.esmaeili-qeshlaqi@daher.com, m.movahedkhah@daher.com

***Résumé* – Dans l'industrie actuelle, l'adaptabilité et l'agilité jouent un rôle essentiel pour les entreprises qui cherchent à maintenir leurs attractivités. Dans le domaine de la logistique en particulier, les exigences des clients deviennent de plus en plus spécifiques et variées en raison d'événements imprévus. Par conséquent, les méthodes de prise de décision, basées sur les données, sont d'une grande utilité pour les gestionnaires d'entrepôts. Ces dernières favorisent une prise de décision éclairée, en particulier dans les situations où l'accès à certaines informations est difficile. Cette étude vise à proposer une méthode de prévision de la demande à court terme qui utilise à la fois des modèles de prévision de séries temporelles traditionnels et modernes, en particulier des modèles statistiques, d'apprentissage automatique et d'apprentissage profond. Cette approche permet non seulement de comparer différentes méthodes, mais aussi d'obtenir des prévisions plus fiables, ce qui permet aux responsables logistiques de prendre des décisions éclairées au niveau opérationnel et même stratégique. Les résultats confirmés par une étude de cas d'un entrepôt industriel démontrent que le modèle GBTree de la catégorie apprentissage automatique présente des performances supérieures dans la phase de prévision, avec un MAPE réduit de 10% par rapport aux autres modèles.**

***Abstract* – In today's industry, adaptability and agility play an essential role for companies seeking to maintain their competitive edge. Particularly in the field of supply chain and logistics, clients' requirements are becoming increasingly specific and variable due to unforeseen events. Therefore, implementing data-driven decision-making methods for warehouse managers is highly beneficial. It promotes informed decision-making, particularly in situations where information is scarce. This study aims to propose a reliable short-term demand forecasting method that utilizes both traditional and modern time series forecasting models, specifically statistical, machine learning, and deep learning models. This approach not only provides a comparison between different methods but also provides more reliable forecasting, enabling managers to make informed decisions at the operational and even strategic levels. The results confirmed by an industrial warehouse case study demonstrate that the GBTree model from the machine learning category exhibits superior performance in the forecasting phase, with a MAPE that is reduced by 10% compared to other models.**

***Mots clés* - apprentissage automatique, prédiction de la demande, gestion des entrepôts, réseau récurrent à mémoire court et long terme (LSTM).**

***Keywords* – machine learning, demand prediction, warehouse management, long short-term memory (LSTM).**

1 INTRODUCTION

In today's industry, managerial agility and making informed decisions are playing an essential role for companies seeking to sustain their competitiveness [Joseph et al., 2024]. Especially in the supply chain and logistics sector, where the nature of the problem is complex, it is crucial to be adaptable and flexible to meet customer requirements, considering potential uncertainties, such as unforeseen events that may affect customers' demand. In the current situation, the conventional methods of warehouse management in various sectors, including inventory optimization, demand forecasting, and resource allocation, are no longer sufficient, particularly when facing uncertainty and unforeseen events. Customer demand data may be inaccessible or vulnerable to last-minute changes with requests being modified or added even one day ahead of their delivery. Therefore, implementing data-driven decision-making methods enables a modern warehouse management approach that can adapt to these dynamic challenges, and it is essential for companies pursuing continuous improvement

[Anderson, 2025]. It is undeniable that providing a vision of daily customer demands for warehouse managers can be widely useful and applied in a variety of disciplines, including both strategic and operational insights for better service evaluation, resource management, and economic models [Shao et Song, 2024], leading to saving time, reducing costs, and enhancing customer satisfaction. Having a good vision of the future helps optimize workforce costs, as well as expenses related to overstocking or understocking [Rahman et Singh, 2024]. Moreover, modern warehouse management is crucial in aviation. Aircraft On Ground (AOG) and Maintenance, Repair, and Overhaul (MRO) emphasize the importance of a reliable supply chain in aviation. An aircraft grounded due to a missing critical part faces significant financial losses and operational disruptions. MRO operations require timely spare part access to maintain efficiency and avoid downtime. Any delay in essential components may result in exponential costs for airlines, manufacturers, and maintenance providers. It is crucial to smooth operations and customer satisfaction in this high-stakes industry. Aeronautical warehouse managers must prevent any delays that could jeopardize the aerospace supply chain, as promptly delivered, supplied, and reliable stock is essential for meeting customer requirements.

The potential for the implementation of modern warehouse management through data-driven decision-making could be present in a variety of sectors and their respective objectives. This study concentrated on short-term demand prediction models utilizing diverse time series forecasting methods, from traditional to modern prediction techniques, in an aeronautical warehouse in France. This study attempts to provide insights for aeronautical warehouse management by performing predictions, thereby facilitating informed decision-making and improved workforce planning. Meanwhile, a comparison between classical and modern time series prediction techniques is analyzed and provided through our case study.

This study is carried out in collaboration with Daher, which stands out for its industrial culture and its ability to offer high value-added services. In collaboration with the operations team at one of Daher's warehouses, we propose a demand forecasting methodology utilizing time series forecasting techniques to forecast daily demands' quantity for the next 15 days. By providing a clear understanding of daily demands and workload, the warehouse management team can optimize resource allocation and effectively address customer needs.

The rest of the paper is organized as follows. Section 2 reviews relevant literature. Detailed description of the problem is presented in Section 3. In Section 4, results and model validation are discussed. In Section 5, managerial insight is discussed. Finally, we reach a conclusion in Section 6.

2 LITERATURE REVIEW

Time series forecasting has been studied for a long time, starting with statistical models. Although these early techniques [Bartholomew, 1971] still have their place, nowadays, AI-based learning methodologies have become widely used compared to other predictive techniques because of their capacity to handle complex data behaviors and improve the precision of demand forecasting.

The relevant studies are divided into two sections after reviewing the existing literature. The first section investigates time series forecasting in warehouses and logistics. Then the highlighted research and findings in both traditional and modern time series models are reviewed, and brief explanations for each section are provided.

2.1 Time Series Forecasting Model for Warehouse Management

Time series forecasting models have wide applications in business decision-making, financial markets, supply chain and warehouse management, healthcare, energy management, and weather forecasting [Kolambe et Arora, 2024]. Responsive operational management allows warehouse managers to keep supply and demand in balance, which is key to their success [Xu et al., 2008]. Time series models are one of the tools for having reactive and responsive management in warehouses, widely studied for inventory management and cost reduction through demand forecasting [Kamble et al., 2015], [Praveen et al., 2019], [Mircetic et al., 2022], [Arnaiz et al., 2023], [Lim et al., 2024] and predicting customer behavior and their trends for forthcoming orders [Alqatawna et al., 2023]. Anomaly detection is another problem addressed by predictive models. In a study, researchers simultaneously forecast demand and detect anomalies using a hybrid time series classification model [Nguyen et al., 2021].

In terms of resource allocation, researchers also widely studied demand time series forecasting to provide managers with a better understanding of workload and improve workforce assignments. Research on demand/order forecasting for both reception and picking zones in warehouses has improved reception and picking operations' efficiency and resource allocation [Van Gils et al., 2017], [Huitink, 2020], [Eichenseer et Winkler, 2024]. Although both reception and picking zones utilize time series data and predictive models can capture various data behaviors, models developed for picking demand may encounter difficulties with the patterns of reception data. To our knowledge, the majority of research has concentrated on picking, with limited studies addressing demand forecasting in reception for improving workforce allocation in reception teams, which is the focus of this study.

2.2 From classical to modern time series forecasting model

Time is the principal characteristic that distinguishes time series from other types of data and forecasting models [Kontopoulou et al., 2023]. Time series data includes a series of sequential data points collected at consistent time intervals, reflecting observations of phenomena that evolve over time. According to the literature, time series methods are categorized into two principal types: traditional and modern AI-based models, as (Figure 1) demonstrates. The highlighted studies are mentioned in each category.

In previous decades, researchers have investigated classical time series models within both statistical and smoothing model categories, which established a foundation for analyzing sequential data and were frequently used for time series forecasting [Kim et al., 2024]. Depending on the short-term or long-term forecasting horizon, the dataset and its important components, and different classical and modern time series models are studied.

In the beginning, smoothing methods like Exponential Smoothing (ES), introduced by Brown and Holt in the 1950s, were used to predict time series data based on the weighted average of past data. Despite the long history of these smoothing methods, many researchers continue in their investigation [Liu et al., 2011], [Tai, 2023]. Another study introduced an advanced prediction method for demand time series forecasting of individual products, utilizing a smoothing technique that

effectively integrates multiplicative seasonality [Tratar et al., 2016].

Also, researchers attempted to integrate smoothing methods with other types of methodologies and proposed hybrid frameworks to enhance their predictive models [Buray et al., 2017]. In a recent study [Saleena et Jessy John, 2020], a hybrid ES method with fuzzy time series has been used, and the efficiency of their model is reported to be better compared to using methods individually.

Autoregressive (AR) models have been considered as another traditional family of time series methods introduced by [Yule, 1927]. Autoregressive models such as AR, Moving Average (MA), Autoregressive Moving Average (ARMA), Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA), Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average (SARIMA), and Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous Regressors (SARIMAX) model have been studied for years in the time series prediction field. These models are esteemed for their exceptional mathematical reliability and accuracy [Singh et al., 2021]. They possess extensive applicability to forecasting timeseries data, for instance, in the health sector for determining the incidence of COVID [Benvenuto et al., 2020], for forecasting medical service demands [Huang et al., 2020], also in the finance sector for forecasting agricultural prices [Jadhav et al., 2017], in the energy management field, and electricity forecasting [Al-Musaylh et al., 2018].

Emerging Deep Learning (DL) techniques involve using two Recurrent Neural Network (RNN)-based models, Long Short-Term Memory (LSTM) and Gated Recurrent Units (GRU), for forecasting in various time series [Yamak et al., 2019], [Sagheer et Kotb, 2019], [Agarwal et al., 2025]. Furthermore, numerous studies have been conducted to compare the performance and efficacy of traditional and modern time series forecasting models across various case studies and datasets in the literature [Sirisha et al., 2022], [Siami-Namini et al., 2019], [Paliari et al., 2021], [Zhou et al., 2020].

This study intends to present various forecasting methodologies, covering traditional to modern approaches, and evaluate their efficacy to identify the most effective ones and compare the performance of different methods in a real case study.

3 Problem Statement

The objective of this study is to propose a time-series prediction model to perform a short-term forecast of the daily inbound volume for an existing warehouse, focusing on univariate time series forecasting. This warehouse provides supply services for the aerospace industry, covering products of various sizes, while our research focuses on the inbound section of the warehouse. In reception, the quantities of parts to be delivered to the warehouse are dependent on customer demands, which inherently involve uncertainties, as customers may request additional deliverables even one day before the scheduled reception date.

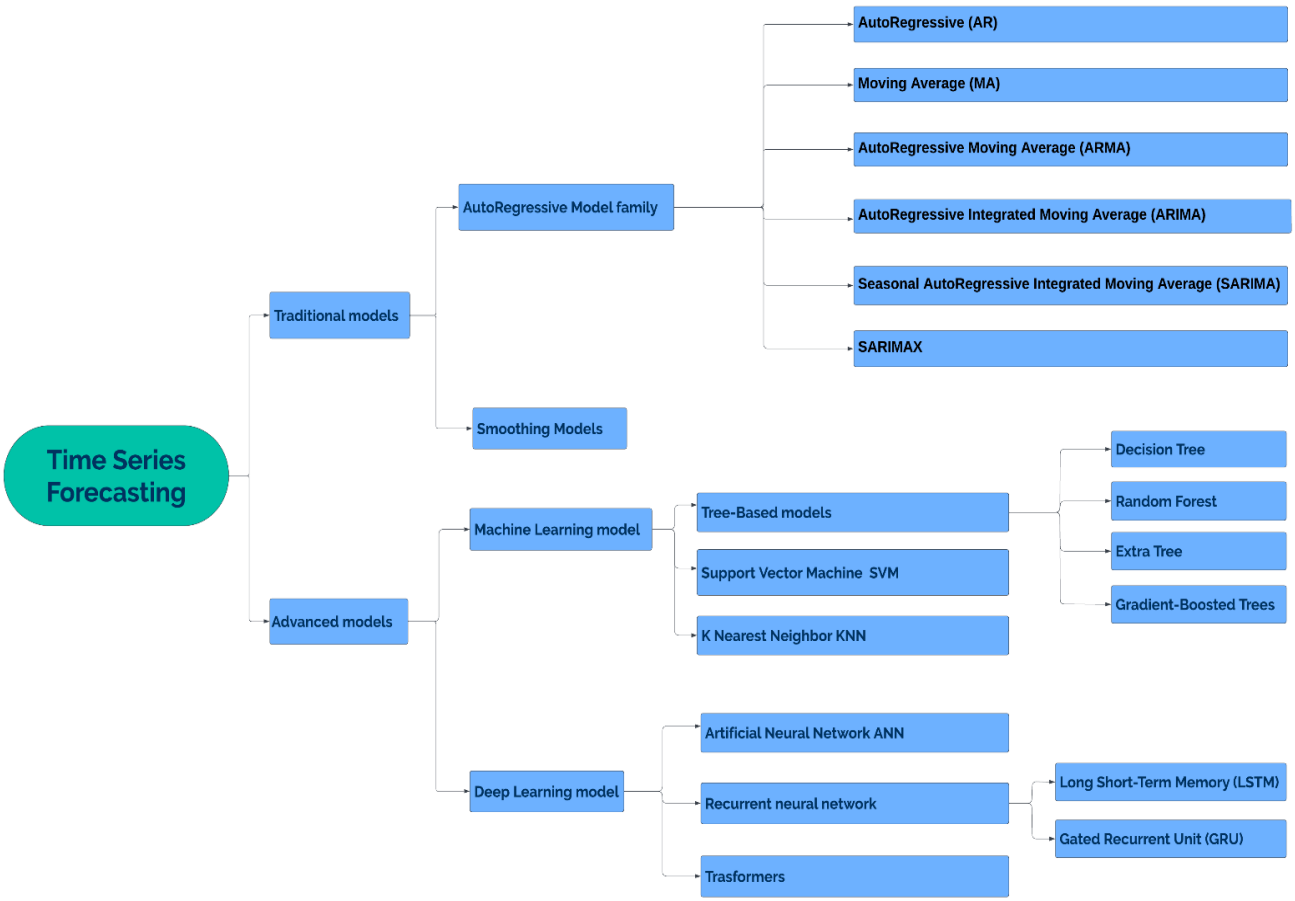


Figure 1. Time series forecasting methods

We conducted our study by proposing various predictive methods for the next 15 days (two work weeks), to evaluate and compare different model typologies and, in the meantime, identify the most accurate one for robust predictions.

Our approach is based on three main families of predictive approaches for a short-term prediction of the quantity of the daily demands:

1. Traditional method: classical statistical time series models, in particular SARIMA;
2. Machine learning methods, particularly decision trees, random forests, extra trees, gradient boosting, and voting ensembles;
3. Deep learning technique known as LSTM (Long Short-Term Memory).

Based on the results of the training, testing, and forecasting phases, the best model, according to its performance, will provide a short-term prediction of the number of demands that need to be received and stocked in the warehouse. It can help the management team make more informed warehouse monitoring decisions.

All the time series models presented in this study are completely developed in a Python environment, utilizing libraries including pandas, numpy, matplotlib and seaborn, sklearn, pmdarima, and statsmodels.

3.1 Data collection and preprocessing

Based on our case study, existing information related to the reception in the Warehouse Management System (WMS) of the physical warehouse was extracted for a period of 20 months, from January 2023 to August 2024, to be used for training forecasting models and performing the prediction phase. The daily reception time series chart is normalized for confidentiality purposes and presented for a particular time frame in (Figure 2). It shows the daily behavior, trends, and seasonality for this dataset. The periodogram in (Figure 3) confirms the weekly seasonality of the data. Since the days of the week in our dataset are categorical, we assigned numerical values (0 to 6) to represent them, and to use them in our models, in which 0 corresponds to Monday and 6 to Sunday. (Figure 4) illustrates the dataset's weekly seasonality. As shown in (Figure 4), the inbound volume during weekends (Saturday and Sunday; encoded by 5 and 6) is either negligible or zero; thus, the weekends are excluded from our time series to create a more stationary dataset for the application of our predictive model. We have also normalized and scaled all the charts to maintain data confidentiality.

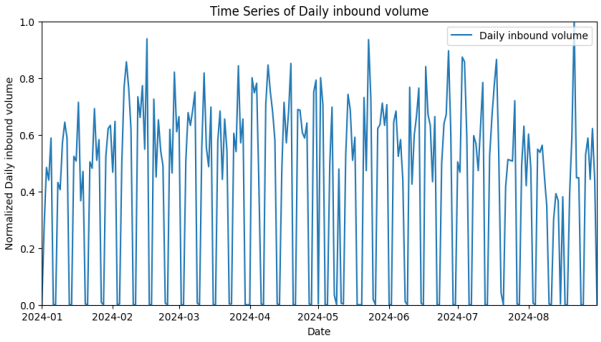


Figure 2. Daily inbound volumes

Various features associated with the demand were included in the dataset extracted from WMS, including the type of reception, reception quantity, article code, urgency, date of demand creation, date of demand modification, requested delivery date, etc. We select the features that were most correlated for our prediction model by considering a Pearson correlation matrix. We are unable to maintain any of the existing features in our model due to their insufficient correlation and explainability. Therefore, we determined to create the daily inbound volume by utilizing the WMS tool and their delivery date as our main component.

To enhance our prediction models with additional input features, we developed various features derived from the daily inbound volume. In time series forecasting, lag features help models capture past dependencies by using previous observations as predictors. Lag 1 to Lag 5 incorporate recent trends. Lag 1 represents the inbound volume from the previous day. Lag 2 represents the inbound volume from two days ago and so on. While Lag 5 specifically accounts for weekly seasonality (the inbound volume from the same weekday in the previous week). Moving averages smooth fluctuations by averaging values over different periods, which helps in identifying long-term trends while reducing noise. Conversely, moving standard deviation quantifies variability, allowing the model to detect periods of high or low volatility. Then, the above-mentioned features, together with "date" and "daily inbound volumes" are used in a confusion matrix to identify the most correlated features (see Figure 5).

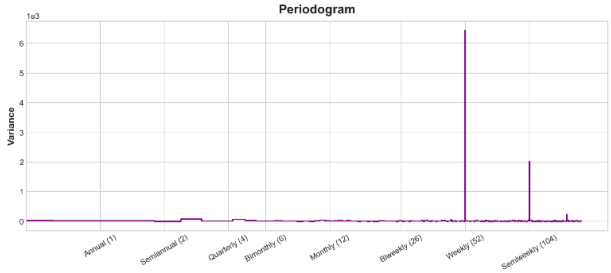


Figure 3. Periodogram for daily inbound volumes

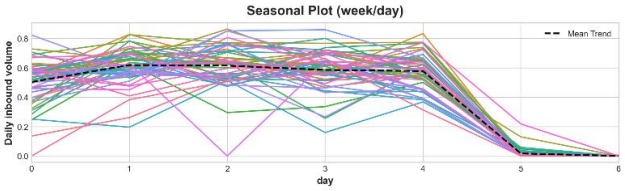


Figure 4. Weekly seasonality for daily inbound volumes

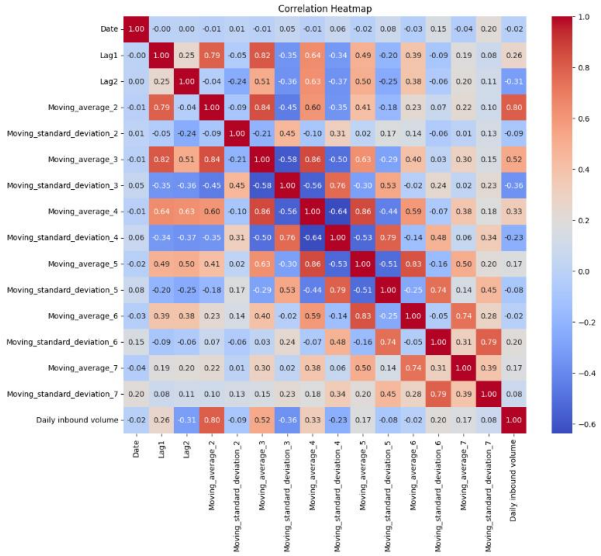


Figure 5. Correlation matrix for feature extraction

The confusion matrix in Figure 5 shows that Lags 1 and 2, moving averages 2, 3 and 4 and the standard deviation calculated with a window size of 3 (i.e. Moving_standard_deviation_3) exhibit an acceptable correlation with our target variable, and hence are chosen to use as input in the prediction models. Furthermore, we encoded the days of the week to represent them numerically, identified as "Day_of_the_week", as an input feature to integrate into our models.

For preprocessing the data, we filled the missing values by imputing them with the mean value. In total, 12 missing values, less than 1% of our data points were found. Also, we removed the outliers caused by official French holidays, and the week-end records as mentioned earlier. Overall, 190 outliers were found and removed from our dataset. The final version of the preprocessed dataset has 419 rows and 9 columns.

3.2 Classical statistical method

In our study, a SARIMA model is proposed to perform the forecasting model. SARIMA is built upon the ARIMA model with additional seasonal hyperparameters denoted s, p, d, and q, which correspond to the ARIMA's hyperparameters. To find the optimal hyperparameters that result in the minimum Mean Absolute Percentage Error (MAPE) value, a grid search is employed in Python to find the best configuration. "s" is fixed to "5 days", to account for the weekly seasonality. "d" is fixed to "0", since the dataset is already stationary, and the other parameters p, q, are tuned with grid search. SARIMA(1,0,0)x(1,0,0,5) is selected among other configurations of hyperparameters with the minimum possible MAPE value.

Table 1. Tree-based models' optimal hyperparameters

Models	Hyperparameters					
	n_estimators	max_features	max_depth	min_samples_split	min_samples_leaf	bootstrap
RandomForest	-	sqrt	8	2	2	-
Decision Tree	10	sqrt	7	3	2	False
Extra Tree	80	sqrt	10	3	1	False
GBTree	100	sqrt	5	2	1	-
Voting ensemble	Combination of Extra Tree and RandomForest					

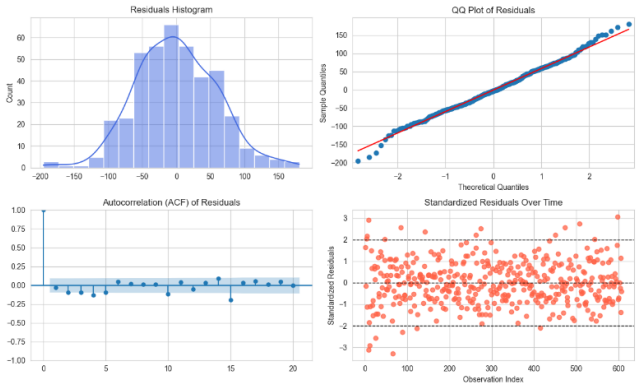


Figure 6. Distribution of residuals between model and training data

(Figure 6) presents the model's residuals after hyperparameter selection and fitting the model to the training data, serving as a validation step. The correlogram showed that the model captured the patterns within the training time series, revealing no significant correlation. Even though the residuals don't follow a completely normal distribution, the model still holds validity as long as it is approximately normal.

3.3 Machine learning method

Tree-based machine learning models are chosen for predictions because of their ability to handle non-linear data patterns. They measure the importance of each feature by estimating its impact on reducing prediction errors, thereby identifying the most important features. Therefore, five tree-based machine learning models have been developed and fitted on the dataset to identify the most effective model based on evaluation metrics for future predictions. The four Tree-based models include Decision Tree (DT), Random Forests (RF), Extremely Randomized Trees (Extra Trees), and Gradient Boosting. Additionally, a Voting Ensemble model that integrates the results of Extra Trees and RF models for enhanced robustness is employed as the fifth prediction model. For hyperparameter tuning of the ML's models, a grid search is utilized in Python to identify the optimal hyperparameters resulting in the best performance. Table 1 shows the different models and their optimal hyperparameters based on grid search. The set of input features and target variable are considered as mentioned in the 3.1 section. It is notable that the dataset is divided into groups: 70% for the training and 30% for the testing phase.

3.4 Deep learning method

For enabling an enhanced comparison among various types of models, an RNN-based DL method known as LSTM is also employed in this research. A sequential model, built using Keras' Sequential API, is proposed for initializing an LSTM model. It consists of two LSTM layers, both utilizing a ReLU activation function. Employing the RMSprop optimizer and the Huber loss function, preparing it for training on the time series data. Hyperparameter tuning optimizes the model by minimizing validation loss over 10 trials to find the best configuration. This configuration allows the model to accurately capture temporal dependencies and produce precise predictions.

4 RESULTS

Seven different prediction models are studied and fitted to our dataset to perform short-term demand forecasting, which was explained in the previous section. We conducted our study by generating forecasts for the next 15 working days using various predictive methods. This allowed us to compare different model types and identify the most accurate one for reliable predictions. This section analyzed the results from the training and testing phases using the proposed evaluation metrics. Then, we analyzed the implementation of the out-of-sample set forecasting phase for the proposed models and discussed the performance of each model in detail.

Normalized Root Mean Squared Error (NRMSE), and Mean Absolute Percentage Error (MAPE), are considered performance metrics for model comparison. NRMSE is a normalized Root Mean Squared Error (RMSE) obtained by dividing RMSE by the mean actual value, which is useful for comparing the model accuracy. Using MAPE, we can easily interpret the percentage error between the predicted and actual values. Results are demonstrated in Table 2. The evaluation of diverse forecasting models indicates that tree-based machine

learning models, specifically GBTree, RF, and the Voting Ensemble, surpass other methodologies in both training and testing datasets. These models exhibit low NRMSE and MAPE, signifying high predictive accuracy, with GBTree outperforming others in test set performance. Conversely, the LSTM deep learning model exhibits unsatisfactory performance, indicated by elevated NRMSE and MAPE values, particularly on the test data, implying difficulties in adaptation. The SARIMA model demonstrates moderate accuracy, outperforming LSTM. The poor performance of LSTM suggests that the historical data available for training the deep learning algorithm might be insufficient.

Table 2. Comparison of the training and testing results

	Evaluation metrics	AR-Based Statistical Model	Tree-based ML models					DL Model
		SARIMA(1,0,0)x(1,0,0,5)	RandomForest	Decision Tree	Extra Tree	GBTree	Voting ensemble	LSTM
Train	NRMSE	0,16	**0,01**	0,03	0,03	**0,01**	0,02	0,20
	MAPE(%)	19	1,32	2,32	3,76	**1,25**	2,20	17,74
Test	NRMSE	0,21	0,07	0,09	0,08	**0,06**	0,07	0,23
	MAPE(%)	21,49	8,47	10,27	10,55	**6,82**	9,03	19,34

Table 3. Comparison of the forecasting results

	Evaluation metrics	AR-Based Statistical Model	Tree-based ML models					DL Model
		SARIMA(1,0,0)x(1,0,0,5)	RandomForest	Decision Tree	Extra Tree	GBTree	Voting ensemble	LSTM
Forecast	NRMSE	0.16	0.14	0.16	**0.13**	**0.14**	0.14	0.14
	MAPE(%)	37.64	25.64	24.88	26.78	**18.43**	26.38	21.59

After the training and testing phase, we used the trained models to predict daily flow arriving at the reception zone for the next 15 workdays, from August 12, 2024, to August 30, 2024. The actual data for these 15 days is extracted from the company's WMS to assess and evaluate the model's performance.

Table 3 illustrates a comparative analysis of the results utilizing the same evaluation metrics. The GBTree model has the best performance on the forecasting phase, with both lower NRMSE and MAPE values. It demonstrates greater adaptability to datasets. (Figure 7) shows the forecast over 15 workdays obtained by each model and the actual value. As it can be seen, the SARIMA model proposed an average value for all data points and failed to capture the behavior of the actual time series. (Figure 8) illustrates the aggregate forecast errors over time. A negative slope indicates that the model is perpetually underpredicting. A positive slope indicates that the model is persistently overestimating. A lower cumulative error indicates superior overall accuracy of the model. The proposed prediction models are, in order of performance: GBTree, DT, LSTM, RF, Voting Ensemble, Extra Tree, and SARIMA.

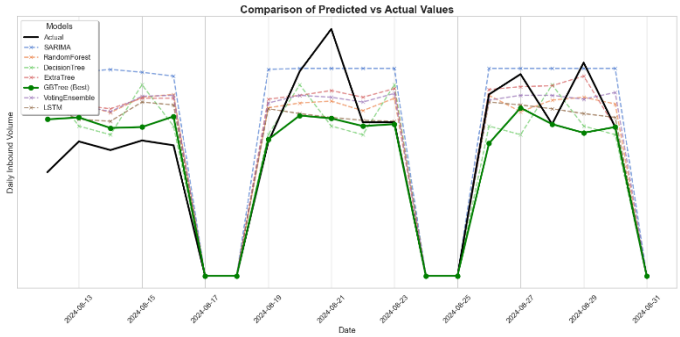


Figure 7. Demonstration of the prediction results: Forecasting phase

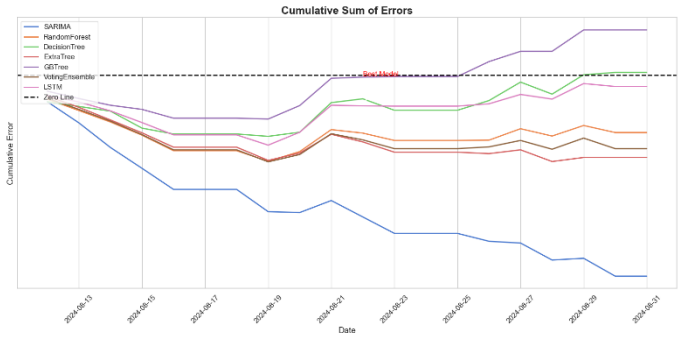


Figure 8. Cumulative forecasting errors through models: trend analysis over time

5 MANAGERIAL INSIGHT

Awareness of the quantity of demands that the warehouse can receive is a significant asset to managers in order to facilitate the planning of their workforce. Consequently, managers can more accurately assign the reception team based on the workloads and allocate the supplementary human resources to another section instead of keeping them in the reception area. Alternatively, managers can assess the extent of work overload and assign additional workers as needed to complete the entire assignment within the requested timeframe and avoid any unexpected reception delays.

Our prediction model provides a vision that can enhance operational efficiency by offering a comprehensive perspective to managers to make more efficient decisions for optimizing resource allocation based on predicted daily charges and predicting unanticipated overloading and/or underloading.

6 CONCLUSION AND PERSPECTIVES

Based on historical time-series data extracted from the WMS, a forecasting model capable of identifying trends and seasonal fluctuations influencing order-receiving activities is developed. We propose utilizing tree-based models, which have demonstrated superior performance compared to LSTM and SARIMA. The GBTree model has demonstrated superior performance, yet its efficacy on additional datasets is required for validation. The case study concerns a Daher warehouse (HUB Logistique) specializing in spare parts management. In this sector, the stakes are particularly high, requiring responsiveness and adaptability to seasonal fluctuations. We conducted a demand prediction study in an industrial context using three main families of predictive approaches. The obtained results demonstrate the interesting performances of these methods, making them suitable for operational warehouse planning. However, we need to validate this initial study on other industrial cases to showcase its effectiveness across diverse datasets. Future work on this study aims to enhance the interpretability of these methods' results, thereby facilitating their integration in an industrial setting. The results of this study can be helpful for managers.

7 ACKNOWLEDGEMENT

This study in the cadre of the **JUMEL**, DAHER R&D project, which stands for “Jumeau numérique Universel pour Modéliser et optimiser l’Entrepôt et la Logistique”, was co-financed by the French government as part of **France2030**, operated by **ADEME**. This work was supported by the French National Association for Technical Research **ANRT (**CIFRE Ph.D. 2023/1454).

8 REFERENCES

Agarwal, S., Sharma, S., Faisal, K. N., & Sharma, R. R. (2025). Time-Series Forecasting Using SVMD-LSTM: A Hybrid Approach for Stock Market Prediction. Journal of Probability and Statistics, 2025(1), 9464938.

Al-Musaylh, M. S., Deo, R. C., Adamowski, J. F., & Li, Y. (2018). Short-term electricity demand forecasting with MARS, SVR and ARIMA models using aggregated demand data in Queensland, Australia. *Advanced Engineering Informatics*, 35, 1-16.

Alqatawna, A., Abu-Salih, B., Obeid, N., & Almiani, M. (2023). Incorporating Time-Series Forecasting Techniques to Predict Logistics Companies’ Staffing Needs and Order Volume. *Computation*, 11(7), 141.

Anderson, K. (2025). Data-Driven Decision Making in Warehouse Management: Leveraging Microservices Architecture.

Arnaiz, A. A. P., Cristal, L. S., Fernandez, A. O., Gubaton, M. R. F., Tanael, D. V., & Centeno, C. J. (2023). Optimizing inventory management and demand forecasting system using time series algorithm. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 20(3), 021-027.

Bartholomew, D. J. (1971). Time Series Analysis Forecasting and Control.

Benvenuto, D., Giovanetti, M., Vassallo, L., Angeletti, S., & Ciccozzi, M. (2020). Application of the ARIMA model on the COVID-2019 epidemic dataset. Data in brief, 29, 105340.

Buray, T., Akın, K. R., Muhammet, B., & Muhammed, S. (2017). Long-Term Time series forecasting using a hybrid Linear Regression and Exponential Smoothing model.

Eichenseer, P., & Winkler, H. (2024). Predicting picking and workforce planning for internal shopfloor material logistics–a simulative, data-driven forecasting model. *Journal of Modelling in Management*.

Huang, Y., Xu, C., Ji, M., Xiang, W., & He, D. (2020). Medical service demand forecasting using a hybrid model based on ARIMA and self-adaptive filtering method. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, *20*, *1-14*.

Huitink, N. J. (2020). Workforce Prediction of Order Picking Personnel (Master's thesis, University of Twente).

Jadhav, V., Chinnappa, R. B., & Gaddi, G. M. (2017). Application of ARIMA model for forecasting agricultural prices.

Joseph, A., Johnson, A., & Cheriyan, A. (2024). Workforce Forecasting Using Artificial Intelligence. *In Artificial Intelligence in Forecasting* (pp. 146-172). CRC Press.

Kamble, S., Desai, A., & Vartak, P. (2015, January). Data mining and data warehousing for supply chain management. In 2015 International Conference on *Communication, Information & Computing Technology (ICCICT)* (pp. 1-6). IEEE.

Kim, J., Kim, H., Kim, H., Lee, D., & Yoon, S. (2024). A Comprehensive Survey of Time Series Forecasting: Architectural Diversity and Open Challenges. arXiv preprint arXiv:2411.05793.

Kolambe, M., & Arora, S. (2024). Forecasting the future: A comprehensive review of time series prediction techniques. *Journal of Electrical Systems*, *20(2s), 575-586.*

Kontopoulou, V. I., Panagopoulos, A. D., Kakkos, I., & Matsopoulos, G. K. (2023). A review of ARIMA vs. machine learning approaches for time series forecasting in data driven networks. *Future Internet*, 15(8), 255.

Lim, S. S. Y., Phouratsamay, S. L., Yahouni, Z., & Gascard, E. (2024, May). Medicine consumption demand forecasting in French hospitals using Seasonal Auto-Regressive Integrated Moving Average (SARIMA) models. In *2024 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD) (pp. IEEE.*

Liu, J. L., Chen, X., & Zhang, T. J. (2011). Application of time series-exponential smoothing model on urban water demand forecasting. *Advanced Materials Research*, 183, 1158-1162.

Mircetic, D., Rostami-Tabar, B., Nikolicic, S., & Maslaric, M. (2022). Forecasting hierarchical time series in supply chains: an empirical investigation. *International Journal of Production Research*, 60(8), 2514-2533.

Nguyen, H. D., Tran, K. P., Thomassey, S., & Hamad, M. (2021). Forecasting and Anomaly Detection approaches using LSTM and LSTM Autoencoder techniques with the applications in supply chain management. *International Journal of Information Management*, 57, 102282.

Praveen, U., Farnaz, G., & Hatim, G. (2019). Inventory management and cost reduction of supply chain processes using AI based time-series forecasting and ANN modeling. *Procedia Manufacturing*, 38, 256-263.

Rahman, A., & Singh, R. (2024). Optimizing Supply Chain Agility and Sustainability: Machine Learning Approaches for Inventory and Logistics Efficiency. *Baltic*

Multidisciplinary journal, 2(2), 43-49.

Sagheer, A., & Kotb, M. (2019). Time series forecasting of petroleum production using deep LSTM recurrent networks. *Neurocomputing*, 323, 203-213.

Saleena, A. J., & Jessy John, C. (2020). A New Hybrid Model Based on Triple Exponential Smoothing and Fuzzy Time Series for Forecasting Seasonal Time Series. In Mathematical Analysis II: Optimisation, Differential Equations and Graph Theory: ICRAPAM 2018, New Delhi, India, October 23–25 (pp. 179-190). Springer Singapore.

Shao, C., & Song, J. (2024, March). An Adaptive Time Series Forecasting Model for Aircraft Component Supply Chain Demand Prediction. In 2024 5th International Seminar on Artificial Intelligence, Networking and Information Technology (AINIT) (pp. *1020-1023). IEEE*.

Siami-Namini, S., Tavakoli, N., & Namin, A. S. (2019). A comparative analysis of forecasting financial time series using arima, lstm, and bilstm. *arXiv preprint arXiv:1911.09512*.

Singh, S., Parmar, K. S., & Kumar, J. (2021). Soft computing model coupled with statistical models to estimate future of stock market. *Neural Computing and Applications*, *33*(13), 7629-7647.

Sirisha, U. M., Belavagi, M. C., & Attigeri, G. (2022). Profit prediction using ARIMA, SARIMA and LSTM models in time series forecasting: A comparison. *IEEE Access*, *10*, 124715-124727.

Tai, A. (2023). Time Series Forecasting of Hong Kong Inter-bank Offered Rate (HIBOR) using Exponential Smoothing State Space Model. Economics, 10(1), 43-48.

Tratar, L. F., Mojškerc, B., & Toman, A. (2016). Demand forecasting with four-parameter exponential smoothing. International Journal of Production Economics, 181, 162-173.

Van Gils, T., Ramaekers, K., Caris, A., & Cools, M. (2017). The use of time series forecasting in zone order picking systems to predict order pickers' workload. International Journal of Production Research, 55(21), 6380-6393.

Xu, W., Yan-Min, J., & Tian-Lai, Y. (2008, July). Research on dynamic scheduling operation method in supply chain based on ant colony optimization. In 2008 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics (pp. 825-830). IEEE

Yamak, P. T., Yujian, L., & Gadosey, P. K. (2019, December). A comparison between arima, lstm, and gru for time series forecasting. In *Proceedings of the 2019 2nd international conference on algorithms, computing and artificial intelligence* (pp. 49-55).

Yule, G. U. (1927). VII. On a method of investigating periodicities disturbed series, with special reference to Wolfer's sunspot numbers. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, *226*(636-646), 267-298.

CAN LLM-BASED AI ASSISTANTS AUTOMATE SYSTEMATIC LITERATURE REVIEWS? CASE STUDY ON LLM APPLICATION IN INDUSTRY

SAMIRA YAZDANPOURMOGHADAM[1], CAMELIA DADOUCHI[2], ESMA YAHIA[3]

[1] LABORATOIRE EN INTELLIGENCE DES DONNEES, DEPARTEMENT DE MATHEMATIQUES ET GENIE INDUSTRIEL, ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL
C.P. 6079, succ. Centre-ville, H3C 3A7, Montréal (Québec), Canada
samira.yazdanpourmoghadam@polymtl.ca

[2] LABORATOIRE EN INTELLIGENCE DES DONNEES, DEPARTEMENT DE MATHEMATIQUES ET GENIE INDUSTRIEL, ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL
C.P. 6079, succ. Centre-ville, H3C 3A7, Montréal (Québec), Canada
camelia.dadouchi@polymtl.ca

[3] LISPEN, ARTS ET MÉTIERS INSTITUTE OF TECHNOLOGY
2 Cours des Arts et Métiers, 13617 Aix-en-Provance, France
esma.yahia@ensam.eu

Abstract

The increasing complexity and volume of industrial research have highlighted the need for more efficient methods of conducting systematic literature reviews (SLRs). This study explores the potential of Large Language Model (LLM)-based AI assistants to partially automate key phases of the SLR process. We propose a structured methodology that leverages a domain-specific Retrieval-Augmented Generation (RAG) pipeline to automate eligibility screening, data extraction, and synthesis. A case study on LLM applications in industrial contexts, specifically manufacturing, supply chain management (SCM), and logistics, is presented. Unlike prior approaches, our pipeline integrates automated information retrieval and question answering with a hybrid evaluation framework that combines BERTScore with human assessments based on accuracy, completeness, relevance, and clarity. Our method achieved an average F1-score of 0.85 and a final hybrid evaluation score of 0.947, indicating strong alignment with human-generated answers. The synthesized outputs were further analyzed to develop a SWOT matrix, offering insight into Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats of LLMs in industrial applications. While the use of RAG-based LLMs significantly reduces the time and cost of conducting SLRs, challenges remain in deployment, scaling, evaluating and ensuring high-fidelity responses. These findings offer practical insights into the future integration of LLMs in domain-specific research workflows.

Résumé

La complexité croissante et le volume important des recherches industrielles ont mis en évidence le besoin de méthodes plus efficaces pour réaliser des revues systématiques de la littérature (SLR). Cette étude explore le potentiel des assistants d'IA basés sur des modèles de LLM pour automatiser partiellement les phases clés du processus de SLR. Nous proposons une méthodologie structurée s'appuyant sur un pipeline RAG (Retrieval-Augmented Generation) spécifique au domaine afin d'automatiser la sélection des documents, l'extraction des données et la synthèse des résultats. Une étude de cas est sur les applications des LLM dans les contextes industriels, notamment la production, la gestion de la chaîne d'approvisionnement et la logistique. Contrairement aux précédentes, notre pipeline intègre la récupération automatique d'information et le question-réponse avec un cadre d'évaluation hybride combinant le BERTScore et une évaluation humaine basée sur l'exactitude, la complétude, la pertinence et la clarté. La méthode a atteint un score F1 moyen de 0,85 et un score hybride final de 0,947. Les réponses synthétisées ont ensuite été analysées pour produire une matrice SWOT (forces, faiblesses, opportunités, menaces). Malgré les bénéfices observés, des défis subsistent quant au déploiement, à la montée en charge, à l'évaluation et à la fidélité des réponses.

Keywords **– Retrieval-Augmented Generation (RAG), AI assistant, LLM-Based Question Answering, SWOT, Automated Systematic Literature Reviews.**

1. INTRODUCTION :

Completing a systematic review has always been a challenging task for most of researchers. Literature shows that it can require several months or even years, primarily due to the growing volume of available scientific information and the time-consuming nature of manual analysis [Munn et al., 2014] However, the emergence of automation tools has significantly reduced the time required to complete these reviews. This progress is particularly critical given the exponential increase in scientific publications [Clark et al., 2020]. For instance, the number of published SRs in PubMed was 80 per day in 2019, had increased to 135 by 2021 [Tóth et al., 2024]. Similar statistics show that over 2,400 systematic reviews and meta-analyses were published in 2019, four times more than the number reported in 2012 in cardiology [Abushouk et al., 2021]. The integration of Natural Language Processing (NLP) and Artificial Intelligence (AI) into automation tools has further accelerated the systematic literature review (SLR) process encompassing the search strategy, literature selection, evaluation (screening & eligibility), data extraction, and synthesis phases [de la Torre-López et al., 2023], all conducted

in accordance with the Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) guidelines [Moher et al., 2015].

According to the study by Scherbakov et al. [2024], recent advancements in Large Language Models (LLMs) have demonstrated promising potential for literature review automation. The study reports that 69.8% of surveyed authors expressed a positive attitude toward integrating LLMs into the review process, highlighting growing interest in semi-automated review pipelines. However, the adoption of these technologies remains limited: only 15.1% of the reviewed studies were actual systematic reviews that incorporated LLMs during their development. This gap underscores the ongoing technological and ethical challenges in producing trustworthy and usable AI-driven literature reviews. They also found that the authors of 31.4% of the 172 literature reviews, utilized LLMs for tasks such as data extraction using GPT-based architectures. However, none of these 172 literature reviews focused on industry-specific contexts. This highlights a potential gap in automated literature reviews, particularly regarding the application of LLMs in industry-specific domains. It underscores the need to streamline the most time-consuming phases of a systematic literature review (SLR), such as full-text screening, eligibility assessment, data extraction, and synthesis, by leveraging the capabilities of LLMs.

Question & Answering tools [Hicke et al., 2023] particularly have strong potential to enhance the efficiency of tasks such as full screening, eligibility assessment and data extraction, and synthesis phases by automating repetitive processes of SLR. The primary goal of this study is to explore how large language models (LLMs) can enhance systematic literature reviews (SLRs) in the industry domain, particularly by automating and improving phases where researchers must read and analyze articles to determine their eligibility and extract relevant data. Specifically, the study aims to address two key research questions.

Question Answering (QA) tools, such as those discussed by Hicke et al. [2023], show strong potential to improve the efficiency of systematic literature reviews (SLRs) by automating repetitive tasks across key phases—namely full-text screening, eligibility assessment, data extraction, and synthesis. Building on this potential, the primary objective of this study is to investigate how Large Language Models (LLMs) can support and enhance SLRs within the industrial domain. In particular, the study focuses on automating and optimizing those phases where researchers traditionally need to read, interpret, and extract relevant data from scientific articles. To guide this investigation, the study addresses two research questions (RQ):

RQ1: How can LLMs automate and enhance the eligibility and extraction phases of systematic literature reviews (SLRs) in the industry domain?

This question investigates how LLMs can be leveraged to streamline the complex tasks of identifying relevant articles and extracting key information, with the goal of enhancing the efficiency, accuracy, and scalability of the SLR process.

RQ2: How can we ensure high fidelity, auditability, and reliability of LLM responses, and what evaluation methods and metrics are appropriate?

The second research question focuses on evaluating the accuracy, reliability, and auditability of LLM-generated outputs in the context of systematic reviews. It aims to identify appropriate evaluation methods and metrics for assessing the quality of responses produced by LLMs.

To address these two research questions, the study investigates how LLM-based tools can augment the Question Answering (QA) process during SLRs. Specifically, it applies and evaluates a domain-adapted RAG-based pipeline on a systematic review focused on the question: *What are the applications and impacts of LLMs in the industrial domain?* The study further explores whether the extracted insights can be synthesized using a SWOT analysis (Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats) to assess the role of LLMs in sectors such as manufacturing, supply chain management (SCM), and logistics.

This article is structured as follows: the section 2 presents the proposed methodology, including PDF corpus selection, information retrieval techniques, and the integration of LLM tools into key SLR phases. Section 3 details the evaluation approach used to assess the quality of the generated outputs.

The results are then synthesized and discussed in Section 4, with particular attention to the practical and methodological implications. Finally, Section 5 dedicated to discussing and analyzing the results from multiple perspectives and outlines the study's limitations and suggests directions for future research.

This study contributes to the field of literature review automation by developing a domain-specific RAG pipeline tailored to industrial applications of LLMs; Proposing a hybrid evaluation approach that combines objective metrics with human judgment; Producing a reference-supported SWOT analysis based on insights from 57 industry-focused articles; Demonstrating meaningful reductions in manual effort required for screening and synthesizing literature.

2. METHODOLOGY

This methodology was developed to meet the primary objective of the study, following the PRISMA framework and the phases presented in Figure 1.

2.1. PDF Corpus Selection

The upstream phases of PRISMA guideline for literature review applied in this phase for selecting PDF corpus.

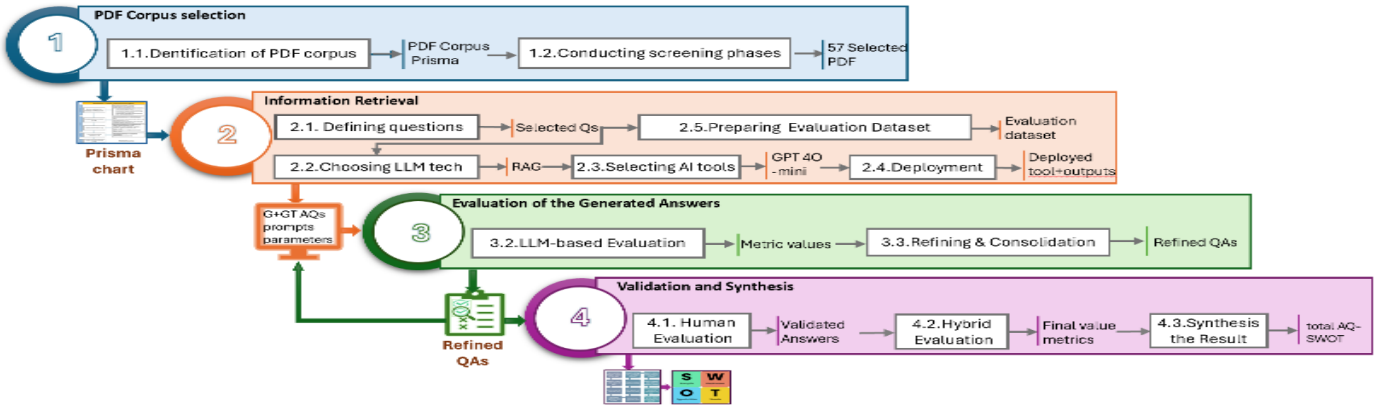


Figure 1. Methodology of the study

2.1.1. Identification of PDF corpus

Since the scope of the studies was defined, in this step the types of information sources and broad eligibility criteria was specified. The search focused on academic databases, such as Scopus, emphasizing the investigation of LLM use in specific industrial contexts, the focus here was manufacturing, SCM and logistics. Keywords and databases included in the search covered two groups of keywords: one related to generative AI including "gen* AI" OR LLM* OR "Large Language Model" and the other specified to the domain application such as "logistic" or "supply chain" or "manufacturing"; Articles not written in English were excluded at this stage, resulting in the removal of four records. Additionally, articles unrelated to industrial domains were excluded. After applying these criteria, a total of 251 records were retained, as detailed in Figure 2.

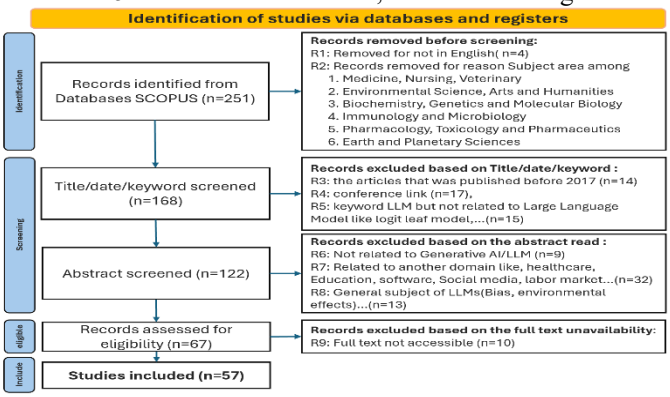


Figure 2. PRISMA Flow chart

2.1.2. Conducting screening phases

The screening process began with a title, date, and keyword review, resulting in the exclusion of 46 articles (Figure 2). Abstract screening was then performed on 122 articles, removing 9 unrelated to LLM/GenAI, 32 outside the industrial scope (e.g., healthcare) and 13 focused on general topics like bias or environmental concerns. So left 67 articles for full-text eligibility assessment. Of these, 10 were excluded due to inaccessibility, yielding a final corpus of 57 PDFs for review.

2.2. Information Retrieval

This phase focused on optimizing the eligibility and data extraction steps of the PRISMA process by leveraging Question Answering (QA) systems powered by Large Language Models (LLMs).QA models, such as those described by Hicke et al. [2023], can read full-text articles, assessing relevance, and answering targeted questions to determine eligibility. They can also summarize findings and extract key insights. However, human oversight remains essential for handling complex judgments and ensuring accuracy in nuanced cases.

2.2.1. Defining questions

The goal of this phase is to extract targeted information from the PDF corpus by answering a set of well-defined questions. These questions were designed to ensure comprehensive coverage of the research topic, directly addressing the two research questions outlined in Section 1 and providing the necessary input for the SWOT analysis. The following 12 focused questions were selected:

1- In what specific domain has LLM been applied in this article?
2- what are the use cases of the LLM in this article?
3- What are the input data for LLM in this study?
4-Which models or algorithms are used in this article?
5-which LLM model is applied in this article?
6-Which approaches were followed in this article?
7-What are the limitations of the LLM in this article?
8-What are the advantages of the use of LLM in this article?
9-What are the methods of evaluation of LLM in this article?
10-What are the LLM evaluation metrics in this article?
11-What are the LLM implementation challenges in this article?
12-Was the LLM deployed in this article and what were the challenges of its deployment?

2.2.2. Choosing LLM Technic

LLMs have significantly enhanced QA systems by improving their ability to comprehend and generate text from large corpora. Integrating LLMs with domain-specific knowledge further improves the accuracy and contextual relevance of responses, enabling QA systems to deliver more precise outputs based on a targeted corpus. This integration has proven especially effective in specialized fields such as insurance and finance, where reliable and accurate responses depend on understanding field-specific terminology and context. There are several techniques available for developing domain-specific QA systems, each varying in complexity, resource requirements, and effectiveness depending on the use case.

Fine-tuning as one of the choices offers strong performance but requires substantial computational power, domain-specific context, and large annotated datasets to be effective [Vieira et al., 2024]. As a result, it is often unsuitable for small corpora or dynamic tasks involving newly published documents. Lightweight adapter techniques such as LoRA [Hu et al., 2021] and PEFT [Houlsby et al., 2019] provide more efficient alternatives to full fine-tuning, but they still necessitate a degree of model modification and retraining.

Simpler methods, such as prompt engineering [Anil et al., 2022], work well for extracting domain-specific information from small or short documents. However, for long and complex texts, these methods face input length limitations, requiring additional strategies such as chunking and iterative extraction. These introduce new challenges, especially when answers must be synthesized across multiple chunks.

In such cases, Retrieval-Augmented Generation (RAG) [Lewis et al., 2020] offers an optimal solution. RAG is particularly well-suited for domain-specific QA tasks involving long or fragmented documents. It enhances question-answering by dividing documents into smaller chunks, retrieving the most relevant content based on a query, and generating informed, context-aware answers. This approach is highly effective for SLRs, where source documents—such as academic papers—are often lengthy and complex. The RAG pipeline used in this study, shown in Figure 3, involves three key phases:

(1) Retrieval Phase: The document is first divided into smaller, manageable chunks. Each chunk is converted into a vector representation, enabling efficient semantic comparison with the user's query. When a question is posed, the system retrieves the most relevant chunks based on their similarity and alignment with the query.

(2) Augmentation phase: The retrieved chunks are then combined with the user's question and a refined prompt to create an enriched context. This augmented input ensures that the model has sufficient and focused information to generate accurate and contextually relevant responses.

(3) Generation phase: Using the enriched context, a LLM generates a coherent and detailed response to the input question. The answer is synthesized from the retrieved information, ensuring it is grounded in the content of the original document. In the context of literature review, this also serves to assess the eligibility and relevance of each article.

2.2.3. Selecting AI tools

Both the retrieval and generation components of the RAG pipeline require selecting appropriate tools and models tailored to the specific use case. For the retrieval phase, we selected FAISS [Johnson et al., 2017], a high-performance vector similarity search tool known for its efficiency in identifying the top-k most relevant text chunks in semantic search tasks.

For the generation phase, we chose GPT as the core language model, following Scherbakov et al. [2024], who highlighted ChatGPT as a leading tool for data extraction in literature reviews due to its ease of use, automation capabilities, and cost-effectiveness. To determine the most suitable GPT variant, we consulted the July 2024 LLM Benchmark Rankings [Trustbit, 2024] and the SEAL Leaderboards by Scale AI [Scale, n.d.], which consistently ranked GPT-4 variants among the top-performing models for text generation. Based on a balance of performance and cost for API usage, GPT-4o-mini was selected.

2.2.4. Deployment

The RAG pipeline was implemented by following steps to automatically extract answers to 12 predefined questions from each PDF article, supporting. The process was carried out using Python and leveraging relevant libraries and functions.

Preprocessing Step:

1-Converting PDF and text cleaning: The RAG pipeline began with data preprocessing, which involved converting PDFs to text and cleaning the content. We used the open-source library pdfplumber [Klotz, 2018] for its ability to handle multi-column layouts and integrate with tools like pandas and NLTK—making it well-suited for academic articles. The cleaning function removed headers, footers, spaces, line breaks, citations, references, appendices, acknowledgments, and stop words, and converted text to lowercase.

2-Chunk the Article: Chunking long texts is essential for preparing input for the RAG pipeline. A function from the NLTK library [Bird et al., 2009] was used to split the text into chunks based on a predefined length. Selecting appropriate parameters is critical for preserving semantic continuity, particularly the maximum chunk length (in characters, words, or sentences) and the overlap size between consecutive chunks, to ensure that key concepts are not lost, especially when splits occur mid-sentence. Based on benchmark practices, we selected a chunk size of 1,000 words with a 200-word overlap.

3-Embedding and indexing the chunks: It is necessary to run a function to embed the chunks, so they were then embedded using OpenAI's text-embedding-ada-002 model [OpenAI, 2023], chosen for its high dimensionality (1,536) and balance of quality, speed, and cost. For semantic indexing, the embedded chunks were stored using FAISS [Johnson et al., 2017], enabling efficient similarity-based retrieval.

4-Embedding the questions: The predefined questions were also embedded using the same embedding model to ensure consistency. These question embeddings were saved for use in the semantic search during the retrieval step.

Retrieval Step: A semantic search function using FAISS was applied to compute similarity scores between the embedding of each question and the embeddings of all text chunks of an article. The system then returned the top-*k* most contextually relevant chunks for each question. Based on the average number of chunks per article and the token limitations of the generative model, top 3 chunks were retrieved per question.

Augmented step: This step concatenates the original question with the retrieved chunks to form enriched input for the generation model.

Generation step: In this step, the system takes the question, retrieved chunks, and a custom prompt as input, and calls the OpenAI API using the GPT-4o-mini model to generate answers. The temperature parameter was set to 0 to minimize hallucinations and ensure precise responses. The max_tokens parameter, which controls the output length, was limited to 500 tokens. The RAG pipeline implemented illustrated in Figure 3.

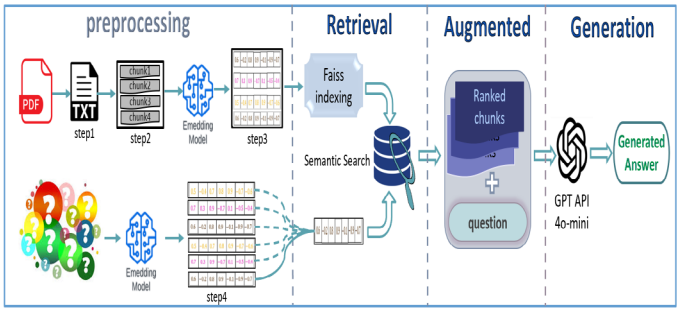


Figure 3- RAG Pipeline of our RAG system

The implementation was conducted in a Google Colab environment using Python, without requiring additional GPU resources. The final output of the RAG system was generated in the form of an Excel file.

2.2.5. Preparing the evaluation dataset

Wang et al. [2024] emphasized the importance of using human-prepared answers as a gold standard for evaluating the quality of RAG-generated responses. However, as noted by Han et al. [2024], it is sufficient to evaluate only a subset of the generated outputs to assess model performance. Based on this, we selected 20% of the final outputs for human evaluation. To ensure meaningful evaluation, the RAG system was expected to generate correct and relevant answers even in cases where the source article did not contain an answer. Therefore, we randomly selected 10 articles from the 122 articles that passed the initial screening phase and may not the answers for the predefined questions. This approach allowed us to include both relevant and non-relevant articles in the evaluation dataset. If a selected article's full text was inaccessible, it was replaced with another random sample.

A human expert then manually answered all 12 predefined questions for each of the 10 articles, forming the reference (evaluation) dataset used for comparison.

2.3. Evaluation of the Generated Answers

This phase aimed to assess whether high-fidelity LLM responses could be achieved and verified, and to identify the most suitable evaluation metrics to support this goal (RQ2).

2.3.1. LLM- based Evaluation

According to Scherbakov et al. [2024], the most used metrics for evaluating LLM performance are precision, recall, and F1-score. Precision measures the proportion of generated content that correctly matches the reference, while recall assesses how much of the relevant reference information is included. F1-score balances both metrics to provide an overall alignment measure. The range value range of these metrics is (0, 1).BERTScore [Zhang et al., 2020] is an objective evaluation metric that computes precision, recall, and F1 using contextual embeddings from BERT-based models. Since it relies on an LLM for comparison, BERTScore can also be considered an LLM-based evaluation method. Compared to traditional n-gram-based metrics like BLEU, BERTScore offers a more nuanced and semantically aware evaluation, which is especially useful in our study involving reference-based answer comparison. BERTScore was applied using its standard library. The average

precision was 0.84, recall was 0.87, and F1-score was 0.85, all falling within the range of 0.77 to 0.97.

2.3.2. Refinement and Consolidation

The goal of this step was to improve the evaluation metrics and, consequently, the overall quality of the generated answers—particularly those that scored below the average in previous evaluation steps. As part of this optimization effort, multiple strategies were explored. In the first attempt, the BERTScore evaluation was repeated using a larger embedding model, "roberta-large", instead of the default "bert-base-uncased" (which has 12 layers and 110 million parameters). However, this change had no significant impact on the final evaluation scores. Other avenues for improvement included adjusting parameters within the RAG pipeline. These included upgrading the embedding model for chunks and questions [Zhong et al., 2024] and modifying the number and length of text chunks [Zhao et al., 2024]. However, these changes also resulted in no noticeable improvement in BERTScore values.

The most effective enhancement, especially from a human judgment perspective, was the addition of clearer prompts and more detailed instructions on how to answer each question, as suggested by Liu et al. [2024]. While this refinement only improved the BERTScore by approximately 1%, it notably enhanced the clarity and relevance of the generated answers.

These optimization and evaluation steps were performed iteratively. On one hand, changes were applied to the output of the Information Retrieval phase (Phase 2), followed by BERTScore re-evaluation. On the other hand, any refinement required re-running the generation model with updated inputs, forming a feedback loop between this evaluation phase and the earlier stages of the pipeline. This loop is illustrated by the green feedback arrow in Figure 3.

2.4. Validation and Synthesis

After several iterations without further improvement in BERTScore values, we advanced to the next phase. This stage focused on finalizing the evaluation and synthesizing all generated answers to fulfill the overall objective of the SLR.

2.4.1. Human Evaluation

Unlike objective metrics such as BERTScore, human evaluation captures nuanced aspects of generated responses—such as relevance, fluency, clarity, and overall satisfaction—from a subjective perspective. It is particularly valuable for assessing higher-level linguistic quality and domain-specific appropriateness, which are essential for evaluating LLM performance across different contexts. The evaluation criteria were based on established literature, including accuracy [Goodrich et al., 2024], relevance and completeness [Wang et al., 2024], and clarity [Yu et al., 2024]. Table 1 defines each criterion and illustrates its relationship with precision and recall. Human scores were assigned on a 5-point Likert scale:(1) Poor, (2) Fair, (3) Good, (4) Very Good, (5) Excellent. Human evaluators reviewed and rated the generated answers to all 12 questions for each of the 10 selected sample articles, with access to both the reference dataset and the full articles when needed.

Table1. Human evaluation Criteria

Criterion	Description	Source
Accuracy (Acc)	Is the information factually correct?	Expert (Human) w=0.7 + bert_recision w=0.3
Completeness (Comp)	Does the answer fully cover all required information?	Expert (Human) w=0.7 + bert_recall w=0.3
Relevance (Relev)	Does the answer address the question directly?	Expert (Human)
Clarity	Is the answer easy to read and understand?	Expert (Human)

2.4.2. Hybrid Evaluation

Best way of Evaluating the performance and outputs of LLMs requires a mix of objective metrics and subjective criteria related to human evaluation for a more well-rounded view of performance. We applied a Hybrid evaluation strategy that enables detailed assessment of RAG system performance and balances Subjectivity and Objectivity by Reducing bias as proposed by [Liang et al., 2022]. This optimized approach enhances the quality of precision, and recall as measured by BERTscore, thorough factual accuracy and completeness, while adding relevance and clarity by human evaluation. The scores of Human evaluations are normalized and scaled from 1-5 to 0-1 to match BERTScore. The integrated scores based on formulas (1), (2), (3) and (4) was done and the results of calculations is shown in Table 2. The integrated scores calculated as follow:

(1): Hybrid-precison = (acc * 0.7) + (bert_precision * 0.3),
(2): Hybrid_recall = (comp * 0.7) + (bert_recall * 0.3),
(3): Hybrid_f1= 2* (1) * (2)/ (1) +(2),
(4): Final Hybrid score = (1) * 0.3 + relev * 0.3 + clarity * 0.2 + (2) * 0.1 + (3) * 0.1.

Table2. hybrid Score

Criterion	weight	Bert-V1	Bert-Final	Human	Hybrid
Precision	0.3	0.875	0.866	0.930	0.911
Recall	0.1	0.8453	0.859	0.945	0.919
F1	0.1	0.859	0.862	-	0.911
Relevance	0.3	-	-	0.989	0.989
Clarity	0.2	-	-	0.993	0.993
Final hybrid score					**0.947**

2.4.3. Synthesis

This literature review was conducted based on the retrieval of 251 articles, which were screened and refined to focus on the automated extraction of data from 57 eligible articles. These articles formed the final corpus used to address the research questions and develop the SWOT analysis.

Given the scope of the study and the volume of material, we selected the most relevant questions from the predefined set of 12 to guide the analysis. Questions related to use cases, advantages, and limitations of LLMs in manufacturing, supply chain management (SCM), and logistics were identified as critical. A subset of 25 relevant articles was selected and analyzed individually. This separation facilitated the summarization task following the answer retrieval phase.

The GPT-4o-mini API [OpenAI, 2023] was used to generate summaries, with references integrated into each output. Due to token limitations, the number of questions posed per article was limited through trial and error, and a maximum of 10 questions was determined to ensure completeness of the responses. The same constraint was considered when generating the SWOT analysis, whose results are presented in the Discussion section.

3. SWOT ANALYSIS

Is this section we will present the summarized results generated using our model and summarizing the strengths, opportunities, weaknesses and threats of using LLMs in industry. The list of the sources cited in this part, provided in this link: (https://drive.google.com/drive/folders/1hkGOSM5P6pFDBX-YZNHqT3oYMaDgaDoK?usp=sharing)

Strengths of using LLMs in industry are included in:

LLMs contribute to sustainability and efficiency by promoting eco-friendly manufacturing, enhancing productivity and work quality, and optimizing resource utilization through predictive and real-time analytics [Akhtar et al., 2024; Ghobakhloo et al., 2024]. They enable agile manufacturing with dynamic system control, fostering cost-effective and adaptive production [Akay

et al., 2023; Van Erp et al., 2023]. They optimize and personalize product designs [Akhtar et al., 2024, Ghobakhloo et al., 2024, Akay et al., 2023, Van Erp et al., 2023]. LLMs empower data-driven decision-making by, improve knowledge analysis, retention and sharing [Park, 2024; Akhtar et al., 2024; Kernan Freire et al., 2024; Akay et al., 2023; Yang et al., 2024; Li & Starly, 2024]. They provide efficient scalability by connecting millions of entities of an ecosystem [Li & Starly, 2024] and adaptable and efficient matrix manufacturing systems [Van Erp et al., 2023]. They help in Validation and optimization of design changes [Akay et al., 2023]. LLMs reduce downtime and operational costs through predictive maintenance and defect analysis. [Sai et al., 2024, Kernan Freire et al., 2023]. They also enhance safety and reliability and quality assurance with automated inspection systems [Zhou et al., 2024; Yang et al., 2024]. LLMs improve task planning, scheduling, execution, and dynamic task allocation, enabling Zero-Shot task planning and adaptive manufacturing systems [Zheng et al., 2024; Fan & Zheng, 2024; Gkournelos et al., 2024, Yang et al., 2024]. They empower robots, reduce human intervention and enhance human-machine/robot interaction [Yang et al., 2024, Fan & Zheng, 2024, Gkournelos et al., 2024, Zheng et al., 2024]. LLMs support the development of advanced smart product platforms [Sai et al., 2024].

Finally, they improve supply chain operations, including automated vehicle navigation for efficient logistics [Akhtar et al., 2024; Wang et al., 2024].

Weaknesses of using LLMs in industry are included in:

There is unidirectional data flow in the industry domain [Akay et al., 2023]. The protectionism and data fragmentation and confidentiality concerns are a barrier to cross-functional knowledge sharing [Akay et al., 2023, Kernan Freire, et al., 2023, Sai et al., 2024, Zhou et al., 2024]. There are challenges in knowledge graph [Zhou et al., 2024] and requirement of knowledge graphs for Continuous updates [Li & Starly., 2024]. AI's poor productivity in complex tasks is another point of weakness [Jackson et al., 2024]. It exists the dependency to expert-in-the-loop [Holland et al., 2024] there is a time-consuming feedback loops [Akay et al., 2023] and lack of standard evaluation methods [Wang et al., 2024] the failure happens in root-cause identification based on long, complex manufacturing processes [Zhou et al., 2024]. lack of access to domain-specific, up-to-date information and high-quality data is big weakness [Akay et al., 2023, Holland et al., 2024, Park, 2024, Fosso Wamba et al., 2024, Zhou et al., 2024, Ghobakhloo et al., 2024, Srivastava et al., 2024, Li & Starly, 2024]. There are challenges in managing and processing and utilizing vast amounts of data. The interpreting disconnected, unstructured, complex data and technical information and industry-specific queries are also challenging [Kernan Freire et al., 2024, Akay et al., 2023, Li & Starly., 2024, Wamba et al., 2023, Richey et al., 2023] There is a need for extensive training data [Li & Starly, 2024, Fan et al., 2024]. And difficulty adapting systems to specific processes without fine-tuning [Holland et al., 2024]. limited visibility and monitoring exist [Jackson et al., 2023]. The operational risk is heightened by misleading and unreliable outputs (hallucinations) [Richey et al., 2023, Wamba et al., 2023], while ethical challenges arising from bias and unreliable responses are significant [Gkournelos et al., 2024, Sai et al., 2024, Richey et al., 2023, Vo, 2023]. There is the dependency of performance to input quality, prompt construction and task complexity [Fan et al., 2024, Kernan Freire et al., 2024, Li & Starly, 2024, Wamba et al., 2023, Fan & Zheng, 2024, Sai et al., 2024, Zheng et al., 2024]. A lack of trust and reliability, compounded by biases and poor interpretability, limits the use of AI outputs [Zhou et al., 2024, Richey et al., 2023, Yang et al.,2024] LLM performance exhibits variability across models [Zhou et al., 2024] There is the limitation to adapt and generalizing to diverse scenarios, complex tasks and weak contextual understanding[Zhou et al., 2024, Fan & Zheng, 2024, Wang et al., 2024, Gkournelos et al., 2024, Sai et al., 2024, Zheng et al., 2024, Fan et al., 2024, Park, 2024]. The disruption in automation happens due to non-expert input [Srivastava et al., 2024] There is lack of algorithmic clarity [Richey et al., 2023]. The data privacy concerns exist in this domain [Fosso Wamba et al., 2024, Kernan Freire et al., 2024]. There are barriers to adaptation to dynamic environments and unpredictable human interventions in manufacturing [Zheng et al., 2024] The limited language comprehension of robots and complexity exists in human robot or machine collaboration [Zheng et al., 2024]. [Yang et al.,2024, Wamba et al., 2023] Thers is the lack of compatibility with existing and legacy [Yang et al.,2024, Wamba et al., 2023, Jackson et al., 2024, Fan & Zheng, 2024, Sai et al., 2024, Park, 2024, Ghobakhloo et al., 2024] and difficulty in integrating LLMs into workflows [Li & Starly, 2024] There is the lack of governance and standardization [Fosso Wamba et al., 2024, Ghobakhloo et al., 2024, Van Erp et al., 2023, Fosso Wamba et al., 2024]. There is a need for workforce retraining [Ghobakhloo et al., 2024] and the development of AI implementation skills [Wamba et al., 2023, Jackson et al., 2023]. There is miscommunication between domain experts and engineers [Jackson et al., 2023]. there is a limit accessibility to resources for smaller businesses [Richey et al., 2023] and scalability due to computational demands and resource barriers for even large businesses [Jackson et al., 2023, Jackson et al., 2024, Fan & Zheng, 2024, Sai et al., 2024]. The need for heavy reliance on experimental testing exists [Sai et al., 2024].

Finally, there are difficulty in accurate simulations for intricate models in SCM [Jackson et al., 2023] there the lack of theoretical readiness for AI adoption in supply chain operations management [Jackson et al., 2024].

Opportunities of using LLMs in industry are included in:

LLMs have ability to support design process in matrix manufacturing systems [Van Erp et al., 2023] and generate realistic simulations or manufacturing system designs and enhance adaptability and optimization [Richey et al., 2023, Sai et al., 2024, Ghobakhloo et al., 2024]. They also give the opportunity of making a virtual design assistance and conceptual design reasoning[Akay et al., 2023] The agile production decisions [Ghobakhloo et al., 2024], context-aware and cognitive assistance and robot control [Kernan Freire, et al., 2023] navigation tasks[Wang et al., 2024], advanced quality management [Zhou et al., 2024, Ghobakhloo et al., 2024] manufacturing service discovery[Li & Starly, 2024] augmented reality interfaces and human-robot collaboration [Gkournelos et al., 2024, Zheng et al., 2024, Fan & Zheng, 2024, Jackson et al., 2023] are another aspects of Opportunities that LLM provide for industry. They also help in anticipating with simulation techniques and providing simulation modeling framework [Kernan Freire, et al., 2023, Jackson et al., 2023]. The novel LLM-Empowered Digital-Twin framework has been emerged [Sun et al., 2024]. The time-series data handling [Sun et al., 2024] will become easier and autonomous process planning agent [Holland et al., 2024] and LLM-based robotic action planner will be emerged [Fan & Zheng, 2024]. The creation of knowledge bases, data source assimilation, insight extraction and trend prediction are facilitated [Park, 2024, Ghobakhloo et

al., 2024]. They help in human-guided refinement strategies [Fan & Zheng, 2024]. The code generation with GPT-3 Codex is automated [Jackson et al., 2023, Zheng et al., 2024] The possibility of task Automation is provided by LLMs [Akay et al., 2023, Wang et al., 2024, Kernan Freire, et al., 2023, Fan et al., 2024, Jackson et al., 2024, Gkournelos et al., 2024, Fan & Zheng, 2024, Holland et al., 2024, Jackson et al., 2023]. The advanced generative models for visual content creation for product designs, simulation models, and visual aids (DALL-E) has been created [Sai et al., 2024] LLMs model such as ChatGPT 3.5/4[Fosso Wamba et al., 2024, Voß, 2023, Akhtar et al., 2024Li & Starly, 2024, Van Erp et al., 2023, Srivastava et al., 2024, Sai et al., 2024, Akay et al., 2023, Wang et al., 2024, Kernan Freire, et al., 2023, Fan et al., 2024, Jackson et al., 2024, Gkournelos et al., 2024, Fan & Zheng, 2024, Holland et al., 2024, Kernan Freire et al., 2024, Zheng et al., 2024] BERT models[Srivastava et al., 2024] Industrial-GPT for Manufacturing 5.0[Yang et al.,2024] Stable Beluga 2, Mixtral 8x7b, Llama 2, Guanaco 65b, and Guanaco 33b[Kernan Freire et al., 2024] can be applied in different industry tasks. The causal knowledge graph-augmented models like causal KGPT [Zhou et al., 2024] and Generative Adversarial Networks (GANs)[Richey et al., 2023, Sai et al., 2024] are also helpful in industry domain. The LLM techniques such as RAG, inductive thematic analysis [Kernan Freire et al., 2024], zero-shot/few-shot prompting [Kernan Freire et al., 2024, Kernan Freire, et al., 2023] extract information, question-answering system, graph embedding techniques[Li & Starly., 2024], top-down and bottom-up prompt strategies[Fan et al., 2024], prompt composition[Fan & Zheng, 2024], p-tuning of chatGLM[Zhou et al., 2024], reinforcement learning from human feedback (RLHF)[Richey et al., 2023] is applicable too. Finally, LLMs help in optimization supply chain management [Zhou et al., 2024, Richey et al., 2023, Jackson et al., 2024] and referred object retrieval and cross-modal feature fusion model for logistics [Fan & Zheng, 2024]. They enable inventory management, demand forecasting, enhancing efficiency and accuracy, real-time decision-making in supply chain [Srivastava et al., 2024], process optimization. The conversational agents have been emerged and user interactions improved [Van Erp et al., 2023, Fosso Wamba et al., 2024, Vob, 2023, Akhtar et al., 2024, Li & Starly, 2024, Sai et al., 2024] and customer support has been advanced by LLMs [Ghobakhloo et al., 2024].

Threatens of using LLMs in industry are included in:
LLMs may lead to flawed decisions due to Stale, Poor-quality or insufficient or incomplete data and slowly & costly integration of data [Akay et al., 2023, Fosso Wamba et al., 2024, Li & Starly, 2024, Ghobakhloo et al., 2024]. Privacy, security, and safety risks associated with the use of LLMs in industry pose significant threats [Kernan Freire, et al., 2023, Sai et al., 2024, Kernan Freire et al., 2024, Richey et al., 2023, Fosso Wamba et al., 2024, Srivastava et al., 2024]. Compliance with regulatory requirements, along with the lack of standardization and governance in data management, remains a major threat to the effective and secure use of LLMs in industry [Fosso Wamba et al., 2024]. Failure in domain-specific tasks or specialized manufacturing processes represents a significant threat [Li & Starly, 2024, Holland et al., 2024]. Instable performance in critical operations poses a threat [Sun et al., 2024]. There is the threaten related to over-reliance on AI algorithms[Richey et al., 2023]. The reliability concerns in addressing environmentally friendly products or circular economy goals are other points of threatens [Akhtar et al., 2024]. The other one could be misleading information from AI [Van Erp et al., 2023] and hallucinations, biases[Richey et al., 2023, Gkournelos et al., 2024, Voß, 2023, Kernan Freire et al., 2024, Sun et al., 2024, Li & Starly, 2024] There are the risk of robotic misalignment [Gkournelos et al., 2024, Fan & Zheng, 2024].The sensor or model errors in real-time settings is point of threaten [Fan et al., 2024, Fan & Zheng, 2024]. There is difficulty in diagnosing or validating AI outputs [Sun et al., 2024]. The excessive expenses and project delays are threatening points [Holland et al., 2024, Ghobakhloo et al., 2024, Fan & Zheng, 2024, Akhtar et al., 2024]. Other threaten is, the existence of partial or fragmented AI solutions [Holland et al., 2024]. LLMs has the potential risk of high implementation or scaling costs [Richey et al., 2023]. The lack of proven benefits creates a threat [Wamba et al., 2023]. There is the high risk related to the failure of early deployment [Fan et al., 2024]. The extended project timelines, increased costs, reduced competitive advantage are other points of threaten [Akay et al., 2023, Gkournelos et al., 2024]. There are operational challenges with workforce resistance or misuse by workers and ethics issues [Richey et al., 2023, Kernan Freire, et al., 2023, Kernan Freire et al., 2024, Ghobakhloo et al., 2024]. There is the need for Complex metric requirements [Fan & Zheng, 2024] The human dependency for validation poses threaten [Li & Starly, 2024]. There are the risk of legal penalties and reputational harm [Kernan Freire et al., 2024]. There is a risk of unfair or discriminatory outcomes from AI [Richey et al., 2023, Wamba et al., 2023, Gkournelos et al., 2024]. There is the risk of underutilization due to poor usability [Gkournelos et al., 2024]. The requirement of continuous model [Fan et al., 2024] and specialized knowledge base adaptation is led to threaten [Kernan Freire et al., 2024]. Finally, the difficulty in fostering a culture of innovation is threaten point [Ghobakhloo et al., 2024].

4. Conclusion

In the previous phases, the PRISMA framework was applied to systematically identify and select articles addressing the defined research questions. A data extraction pipeline was implemented using the RAG method, the GPT-4o-mini model, and supporting Python libraries. Data synthesis was performed with the assistance of the GPT API, allowing for the structured aggregation of insights.
The evaluation strategy involved comparing generated answers with human-prepared references using BERTScore, a LLM-based metric for semantic similarity. This process enabled the refinement of prompts and question design, which led to measurable improvements in evaluation scores. In addition, a hybrid evaluation approach was adopted, combining BERTScore metrics with human judgment across four dimensions: accuracy, completeness, relevance, and clarity.
These steps enabled the partial automation of the eligibility and data extraction phases of the SLR process. The primary aim of the study was to evaluate whether LLMs could effectively support systematic literature reviews, with a specific focus on their application in industrial domains.
While the proposed methodology was successfully implemented, several challenges were encountered. Each LLM-based tool demonstrated both strengths and limitations. For instance, although ChatGPT provided high-quality outputs, it was costly and time-consuming due to token limitations when processing a large volume of PDFs via API. The RAG approach helped mitigate this issue but required specialized knowledge and coding skills. Moreover, managing RAG outputs at scale introduced additional complexity.
Another key challenge was the validation of generated answers. Achieving high-fidelity responses and determining the most appropriate evaluation method proved difficult, as there is

currently no universally accepted framework for LLM evaluation. While metrics such as perplexity, BLEU, and BERTScore are commonly used, none offers a comprehensive assessment on its own. Based on our findings, we support the conclusions of Liang et al. [2022], which emphasize that human evaluation remains essential, as objective metrics alone are insufficient to guarantee answer quality.

Despite these limitations, the use of LLMs significantly facilitated and accelerated the literature review process. Future research should focus on enhancing the reliability of LLM-generated outputs and developing more integrated LLM-based AI assistants to support high-confidence, automated systematic reviews.

In conclusion, this study demonstrates the feasibility and potential of LLM-powered pipelines for automating key stages of systematic literature reviews. While significant challenges remain—particularly in evaluation, scalability, and synthesis—this approach offers a promising foundation for future research workflows. With continued advancements in LLM technology and better integration frameworks, AI-assisted SLRs may soon become a practical standard for research teams.

RÉFÉRENCES

Abushouk, A. I., Yunusa, I., Elmehrath, A. O., Elmatboly, A. M., Fayek, S. H., Abdelfattah, O. M., ... & Kapadia, S. (2021). Quality assessment of published systematic reviews in high impact cardiology journals: revisiting the evidence pyramid. Frontiers in Cardiovascular Medicine, 8, 671569.

Anil, C., Wu, Y., Andreassen, A., Lewkowycz, A., Misra, V., Ramasesh, V., ... & Neyshabur, B. (2022). Exploring length generalization in large language models. *Advances in Neural Information Processing Systems*, *35*, 38546-38556.

Bird, S., Klein, E., & Loper, E. (2009). Natural language processing with Python. O'Reilly Media, Inc.

Clark, J., Glasziou, P., Del Mar, C., Bannach-Brown, A., Stehlik, P., & Scott, A. M. (2020). A full systematic review was completed in 2 weeks using automation tools: a case study. *Journal of clinical epidemiology*, *121*, 81-90.

De la Torre-López, J., Ramírez, A., & Romero, J. R. (2023). Artificial intelligence to automate the systematic review of scientific literature. *Computing*, *105*(10), 2171-2194.

FAISS: Johnson, J., Douze, M., & Jégou, H. (2017). *Billion-scale similarity search with GPUs*. Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). https://arxiv.org/abs/1702.08734

Goodrich, B., Rao, V., Liu, P. J., & Saleh, M. (2019, July). Assessing the factual accuracy of generated text. In *proceedings of the 25th ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery & data mining* ,166-175.

Han, R., Zhang, Y., Qi, P., Xu, Y., Wang, J., Liu, L., ... & Castelli, V. (2024). Rag-qa arena: Evaluating domain robustness for long-form retrieval augmented question answering. *arXiv preprint arXiv:2407.13998*.

Hicke, Y., Agarwal, A., Ma, Q., & Denny, P. (2023). ChaTA: Towards an Intelligent Question-Answer Teaching Assistant using Open-Source LLMs. *arXiv preprint arXiv:2311.02775*.

Houlsby, N., Giurgiu, A., Jastrzebski, S., Morrone, B., De Laroussilhe, Q., Gesmundo, A., ... & Gelly, S. (2019, May). Parameter-efficient transfer learning for NLP. In *International conference on machine learning* (pp. 2790-2799). PMLR.

Hu, E. J., Shen, Y., Wallis, P., Allen-Zhu, Z., Li, Y., Wang, S., ... & Chen, W. (2021). Lora: Low-rank adaptation of large language models. *arXiv preprint arXiv:2106.09685*.

Klotz, J. (2018). pdfplumber: Python library for PDF parsing& extraction. GitHub.https://github.com/jsvine/pdfplumber.

Liang, P., Bommasani, R., Lee, T., Tsipras, D., Soylu, D., Yasunaga, M., ... & Koreeda, Y. (2022). Holistic evaluation of language models. *arXiv preprint arXiv:2211.09110*.

Liu, T., Qi, J., He, P., Bisazza, A., Sachan, M., & Cotterell, R. (2024). Likelihood as a Performance Gauge for Retrieval-Augmented Generation. *arXiv preprint arXiv:2411.07773*.

Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., Petroni, F., Karpukhin, V., Goyal, N., ... & Kiela, D. (2020). Retrieval-augmented generation for knowledge-intensive nlp tasks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, *33*, 9459-9474.

Moher, D., Shamseer, L., Clarke, M., Ghersi, D., Liberati, A., Petticrew, M., ... & Prisma-P Group. (2015). Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. *Systematic reviews*, *4*, 1-9.

Munn, Z., Peters, M. D., Stern, C., Tufanaru, C., McArthur, A., & Aromataris, E. (2018). Systematic review or scoping review? Guidance for authors when choosing between a systematic or scoping review approach. *BMC medical research methodology*, *18*, 1-7.

OpenAI. (2023). openai: Python client for OpenAI API. GitHub. https://github.com/openai/openai-python.

Scherbakov, D., Hubig, N., Jansari, V., Bakumenko, A., & Lenert, L. A. (2024). The emergence of Large Language Models (LLM) as a tool in literature reviews: an LLM automated systematic review. *arXiv preprint arXiv:2409.04600*.

Tóth, B., Berek, L., Gulácsi, L. *et al.* Automation of systematic reviews of biomedical literature: a scoping review of studies indexed in PubMed. *Syst Rev* **13**, 174 (2024).

Trustbit. (2024, July). *LLM leaderboard – July 2024*. Trustbit. https://www.trustbit.tech/en/llm-leaderboard-juli-2024

Vieira, I., Allred, W., Lankford, S., Castilho, S., & Way, A. (2024). How Much Data is Enough Data? Fine-Tuning Large Language Models for In-House Translation: Performance Evaluation Across Multiple Dataset Sizes. *arXiv preprint arXiv:2409.03454*.

Wang, Y., Hernandez, A. G., Kyslyi, R., & Kersting, N. (2024). Evaluating quality of answers for Retrieval-Augmented Generation: A strong LLM is all you need. *arXiv preprint arXiv:2406.18064*.

Yu, H., Gan, A., Zhang, K., Tong, S., Liu, Q., & Liu, Z. (2024, August). Evaluation of retrieval-augmented generation: A survey. In *CCF Conference on Big Data* (pp. 102-120). Singapore: Springer Nature Singapore.

Zhang, T., Kishore, V., Wu, F., Weinberger, K. Q., & Artzi, Y. (2019). Bertscore: Evaluating text generation with bert. *arXiv preprint arXiv:1904.09675*.

Zhao, S., Yang, Y., Wang, Z., He, Z., Qiu, L. K., & Qiu, L. (2024). Retrieval augmented generation (rag) and beyond: A comprehensive survey on how to make your llms use external data more wisely. *arXiv preprint arXiv:2409.14924*.

Zhong, Z., Liu, H., Cui, X., Zhang, X., & Qin, Z. (2024). Mix-of-Granularity: Optimize the Chunking Granularity for Retrieval-Augmented Generation. *arXiv preprint arXiv:2406.00456*.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Data Challenges in Computer Vision based Digital Twin for Manufacturing Systems

NESSRINE FARHAT[1,2], PIERRE DAVID[1], NUNO GARCIA[2], LEAH RIFI[1]

[1] UNIV. GRENOBLE ALPES, CNRS, GRENOBLE INP*, G-SCOP
* INSTITUTE OF ENGINEERING UNIV. GRENOBLE ALPES
38000 Grenoble, France
prenom.nom@grenoble-inp.fr

[2] LASIGE, FACULDADE DE CIENCIAS, UNIVERSIDADE DE LISBOA
1749-016 Lisbon, Portugal
ncgarcia@ciencias.ulisboa.pt

***Résumé* – À l'ère de l'Industrie 4.0, la création des Jumeaux Numériques constitue un défi majeur pour l'optimisation des systèmes de production grâce à la surveillance et à l'analyse en temps réel. Le succès d'un Jumeau Numérique repose sur la disponibilité, la qualité et l'intégration fluide des données pour assurer une prise de décision efficace. Toutefois, garantir des données cohérentes et précises pose plusieurs défis, en particulier dans des environnements de fabrication complexes. Cet article examine ces défis et évalue différentes méthodes de collecte et d'intégration des données dans le développement d'un Jumeau Numérique pour la production d'une hydrolienne. Deux approches ont été explorées : la collecte de données réelles dans les ateliers d'assemblage et la génération de données synthétiques à partir de modèles CAO. Bien que les données réelles offrent une grande authenticité, elles présentent des défis tels que la complexité de l'annotation manuelle et les préoccupations en matière de confidentialité. À l'inverse, les données synthétiques permettent une génération à grande échelle mais souffrent d'un écart de domaine avec les données réelles. Pour surmonter ces limites, une approche mixte est proposée, combinant des données réelles, spontanées et contrôlées, et synthétiques avec des techniques d'annotation semi-automatisées afin d'améliorer la fiabilité des modèles.**

***Mots clés* - Jumeau Numérique, industrie 4.0, Défis des Données, Vision par Ordinateur.**

***Abstract* – In the era of Industry 4.0, the creation of Digital Twins presents a significant challenge for optimizing production systems through real-time monitoring and analysis. The success of a Digital Twin heavily depends on the availability, quality, and seamless integration of data to support informed decision-making. However, ensuring consistent and accurate data poses several challenges, particularly in complex manufacturing environments. This article explores these challenges and evaluates different data collection and integration methods in the development of a Digital Twin for tidal turbine production. Two data acquisition approaches were investigated: real data collection from assembly workshops and synthetic data generation using CAD models. While real data offers authenticity, it presents challenges related to manual annotation complexity and privacy concerns. Conversely, synthetic data provides scalability but suffers from the domain gap, limiting its applicability to real-world scenarios. To overcome these limitations, a mixed-data approach is proposed, combining real data, spontaneous and controlled, as well as synthetic data, with semi-automated annotation techniques to improve data reliability and model accuracy. This comprehensive approach aims to enhance the robustness and effectiveness of Digital Twin systems, enabling more accurate representation and better decision-making in manufacturing environments.**

***Keywords* – Digital Twin, Industry 4.0, Data Challenges, Computer Vision.**

1 INTRODUCTION

In the context of Industry 4.0, manufacturing systems are undergoing a significant transformation driven by the integration of advanced technologies aimed at enhancing productivity, reducing operational costs, and improving efficiency. Among these innovations, the concept of the digital twin has emerged as a pivotal tool for enabling intelligent, data-driven manufacturing operations. A Digital twin (DT) is a key enabling technology in Industry 4.0 that acts as a virtual counterpart to physical systems, allowing industries to simulate, monitor, and optimize processes in real-time by continuously updating the virtual model based on data from the physical environment [Zribi et al., 2023]. This dynamic evolution facilitates enhanced decision-making, process optimization, and predictive maintenance, enabling manufacturers to achieve greater efficiency and responsiveness. Similarly, [Liu et al., 2021] define a digital twin as a virtual replica of a physical system that facilitates real-time monitoring, analysis, and decision-making, providing manufacturers with unprecedented insights into their production processes. By accurately reflecting its physical counterpart, a DT allows manufacturers to optimize workflows, anticipate maintenance needs, and enhance resource allocation, ultimately fostering agility and resilience in manufacturing ecosystems. These definitions highlight the fundamental role of digital twins in modern smart manufacturing, demonstrating their potential to bridge the gap

between the physical and digital realms and guide data-driven decision-making.

The successful implementation of a digital twin hinges on the seamless integration and continuous data flow between the physical and digital domains. Throughout its lifecycle, from initial development to real-time operational updates, data serves as the backbone of a DT, offering valuable insights into the past, present, and future states of the system. This dynamic synchronization enables informed decision-making, predictive analytics, and proactive response strategies. However, achieving a fully functional and reliable digital twin presents several challenges, particularly in complex manufacturing environments. The presence of heterogeneous data sources, varying formats, and inconsistent quality creates significant barriers to achieving an accurate and robust digital representation. Addressing key challenges such as data availability, interoperability, and quality assurance is crucial for the success of digital twins deployment in industrial settings.

In the manufacturing context, one promising solution to these challenges is using computer vision. Leveraging high-resolution cameras and advanced image processing algorithms, computer vision techniques can capture detailed information about the physical environment, including object dimensions, movements, and conditions. These capabilities make computer vision an invaluable asset in both the creation and operational phases of a digital twin. During the creation phase, computer vision aids in developing accurate digital models by providing high-fidelity visual data, while in the operational phase, it ensures continuous updates through real-time visual monitoring, maintaining synchronization between the physical and digital systems.

This article explores the concept of digital twins in manufacturing, focusing on the challenges associated with data acquisition and integration. First, we discuss the key data-related issues that impact the effectiveness of digital twins, including data availability and accessibility, data quality that affects the decision-making of the DT, and interoperability between real and virtual systems. These challenges must be addressed to ensure the accuracy and efficiency of digital twins in industrial settings. Then, we examine how computer vision tasks can serve as potential solutions to mitigate these challenges. By enabling automated data collection, enhancing data quality, and facilitating seamless integration, computer vision offers promising approaches to overcome limitations in traditional data acquisition methods. Finally, a case study is presented to illustrate the practical application of these concepts within the production system of a tidal turbine. In this study, two approaches for training a computer vision model for object detection are tested: real-world data acquisition and synthetic data generation. While each approach presents unique challenges, a mixed-data strategy is proposed to combine the strengths of both methods, thereby improving the reliability and performance of data gathering.

2 Data-related Challenges in the Lifecycle of Digital Twins

Digital twins have emerged as a transformative technology in Industry 4.0, playing a crucial role in modern smart factories by mirroring the real world and optimizing real-time operations [Soori et al., 2023]. They may for example— enable manufacturers to enhance productivity, streamline decision-making, and improve predictive maintenance.

Despite these benefits, the development and deployment of digital twins present significant challenges. Their implementation requires specialized expertise, substantial data availability, and considerable time investment [Sommer et al., 2023]. Moreover, establishing a robust infrastructure, including advanced sensors, IoT devices, and efficient data management systems, is critical to ensuring accurate and consistent performance [Wu et al., 2023].

According to [Fuller et al., 2020] and [Omrany et al., 2023], key challenges in the implementation of DTs include data availability, quality, standardization, , integration with existing legacy systems, and real-time data synchronization and processing during DT operation. Additionally, significant concerns arise regarding security and resource requirements, which can impact the deployment and operation of DTs in industrial settings. The following sub-sections provide an overview of the primary challenges associated with Digital Twin creation and deployment.

2.1 Data Availability and Accessibility:

Manufacturing environments generate vast amounts of data from various sources, including sensors, machines, and production systems. However, ensuring seamless access to this data remains a significant challenge due to several factors. One of the primary obstacles is the existence of data silos, where information is compartmentalized across different departments or systems, limiting cross-functional accessibility and hindering a holistic view of operations. Additionally, the presence of incompatible formats, resulting from the use of proprietary data structures across various platforms, makes integration difficult and requires extensive preprocessing efforts [Wang et al., 2018]. Moreover, many manufacturing facilities still rely on legacy systems that were not originally designed for modern data exchange. These older machines may lack the capability to generate or share data efficiently, further complicating the transition to digital solutions and limiting the ability to fully leverage the benefits of Digital Twins [Chirumalla, 2021].

2.2 Data Quality and Accuracy:

The effectiveness of Digital Twins relies heavily on the quality and accuracy of the data they receive. Poor data quality can lead to inaccurate models and unreliable insights, ultimately affecting decision-making and operational efficiency [Sharma et al., 2022]. Inconsistencies among disparate data sources often present conflicting information, leading to confusion and misinterpretations that impact production planning and predictive maintenance. Additionally, inaccuracies caused by sensor malfunctions, environmental conditions, or transmission errors can introduce erroneous data points, compromising the reliability of the Digital Twin. Furthermore, missing data due to gaps in collection processes, whether from network failures, incomplete sensor coverage, or manual recording errors, can result in incomplete models, leading to ineffective or incorrect predictions[Zhang & Thorburn, 2022]. Addressing these challenges requires rigorous data validation processes and continuous monitoring to ensure the integrity and reliability of the data used in Digital Twin applications.

2.3 Data Standardization and Interoperability:

The lack of standardized data formats and integration protocols across different systems presents a major challenge in Digital Twin implementation. Many manufacturing environments rely on proprietary formats, where each system utilizes unique data structures that hinder seamless communication and integration with other platforms [Singh et al., 2021]. This lack of uniformity leads to non-interoperable systems, where software and hardware solutions from different vendors struggle to exchange and process data efficiently, requiring costly and complex customization efforts [O'Connell et al., 2023]. Additionally,

semantic differences in data interpretation across various systems create inconsistencies in analysis and decision-making, as the same data element may carry different meanings depending on the context in which it is used. Overcoming these challenges requires the adoption of industry-wide standards and frameworks that promote data uniformity and facilitate smoother interoperability between diverse systems.

2.4 Real-Time Data Processing and Synchronization

For a Digital Twin to accurately reflect its physical counterpart, real-time data processing and synchronization are critical. Managing the high volume of data generated from multiple sources in real time poses a significant challenge, requiring robust infrastructure and advanced computational capabilities to handle and analyze large data streams efficiently [Sharma et al., 2022]. Additionally, ensuring continuous updates between the physical and digital systems is a complex task, as interruptions or delays in data flow can result in outdated or inaccurate representations of the production environment. Achieving synchronization across multiple interconnected systems further complicates the process, as variations in data processing speeds, communication delays, and network inconsistencies can lead to discrepancies between the physical and virtual environments. Addressing these challenges requires the deployment of high-speed data processing solutions, edge computing, and efficient synchronization mechanisms to ensure real-time operational accuracy.

2.5 Data Privacy and Security

Given the sensitive nature of manufacturing data, ensuring data privacy and security is of paramount importance to prevent unauthorized access and cyber threats [Varadharajan & Bansal, 2016]. One of the major concerns is data protection, which involves safeguarding proprietary manufacturing processes, intellectual property, and sensitive operational data from unauthorized access or leaks. The increasing connectivity of Digital Twins exposes them to cybersecurity risks, including potential cyberattacks and data breaches that can disrupt operations and compromise confidential information [Jaber et al., 2025]. Moreover, ensuring regulatory compliance with data protection laws and industry standards adds another layer of complexity, as manufacturers must balance the need for data accessibility with strict compliance requirements. Implementing robust cybersecurity measures, such as encryption, access controls, and continuous monitoring, is essential to mitigate these risks and ensure the secure deployment of Digital Twin solutions.

The successful deployment and operation of Digital Twins in manufacturing requires overcoming data challenges that impact their efficiency, accuracy, and reliability. Computer vision provides promising solutions by automating data collection, extracting valuable information from visual sources, and reducing reliance on manual input. It enhances data accuracy by minimizing human errors and ensuring structured data acquisition. In terms of interoperability, vision-based systems standardize visual data extraction, facilitating seamless integration with digital models. However, computer vision also faces limitations, including sensor errors, poor lighting conditions, occlusions, and variations in object appearance. Additionally, deep learning models require large annotated datasets, which can be costly and time-consuming to develop. Beyond these technical hurdles, computer vision introduces privacy concerns for operators who may be filmed during production processes, potentially leading to resistance or lack of acceptance of the system. Despite these challenges, leveraging computer vision effectively can significantly enhance data-driven decision-making and improve the performance of Digital Twins.

3 ENHANCING THE DIGITAL TWIN LIFECYCLE WITH COMPUTER VISION

The effectiveness of Digital Twins, from their development to deployment and operation, relies heavily on the availability, accuracy, and seamless integration of high-quality data to mirror the real world and monitor manufacturing processes. It is where computer vision may play a pivotal role, offering advanced techniques to automate data creation, acquisition, and integration into Digital Twin systems. By capturing and processing visual information from the physical environment, computer vision may enhance the quality and accessibility of data, supporting real-time decision-making and processes operational management.

In the following subsections, we will explore the key tasks of computer vision and their role in improving the overall lifecycle of Digital Twins.

3.1 An Overview of Computer Vision: Concepts and Applications

Computer vision, a key branch of artificial intelligence, empowers machines to interpret and analyze visual information from their surroundings, mimicking the capabilities of human vision [Ettalibi et al., 2024]. By extracting meaningful insights from images and videos, computer vision plays a pivotal role in transforming manufacturing processes, driving improvements in quality control, operational efficiency, and overall productivity. Below, we explore some of its core tasks and some of their practical applications in the manufacturing domain.

1. **Image Classification:**

This task involves assigning a label to an entire image based on its content. For example, an image containing a defective product might be labeled as "DEFECTIVE" without specifying its position in the image. In manufacturing, image classification is widely used for automated quality control, enabling systems to quickly identify flawed items on assembly lines and flag them for removal, thereby enhancing production efficiency and reducing waste.

2. **Classification with Localization:**

Building upon image classification, this task not only identifies objects but also pinpoints their location within an image by drawing bounding boxes around them. This added spatial context is invaluable in manufacturing. For instance, it can ensure that components are correctly positioned during assembly, helping to minimize errors and improve product quality.

3. **Object Detection:**

Taking localization further, object detection identifies and classifies multiple objects within an image while providing bounding boxes for each. This capability is essential for automating complex manufacturing processes. For example, in automated sorting systems, object detection enables the identification and separation of different parts, streamlining logistics and ensuring accurate material handling. In assembly lines, object detection verifies the presence and correct placement of components, such as confirming that all required parts are installed and the product is properly assembled before moving it to the next stage. Additionally, it supports inventory management by monitoring stock levels and identifying missing parts, thereby ensuring that production workflows remain uninterrupted.

4. **Semantic Segmentation:**

Unlike object detection, which relies on bounding boxes, semantic segmentation assigns labels to every pixel in an image, offering a highly detailed understanding of scenes. This granularity makes it ideal for inspecting products at a microscopic level, detecting surface defects, scratches, or irregularities that might otherwise go unnoticed. By integrating semantic segmentation into inspection workflows, manufacturers can achieve higher quality standards and reduce the likelihood of defective products reaching customers.

Figure 1 illustrates the four key computer vision tasks—image classification, classification with localization, object detection, and semantic segmentation—demonstrating their respective roles in visual data processing.

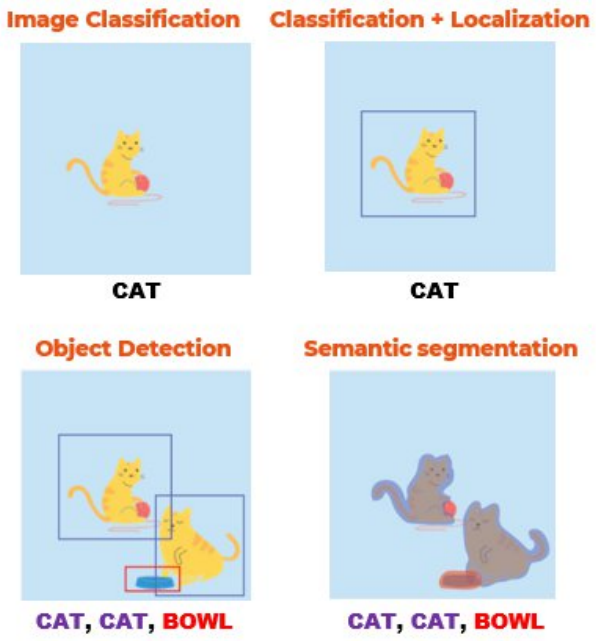


Figure 1. Types of Computer Vision tasks

3.2 Overcoming Data Challenges in Digital Twins Using Computer Vision

Computer vision may play a pivotal role in overcoming the data-related challenges that hinder the development and deployment of digital twins in manufacturing systems. By enabling the automated extraction and integration of high-quality visual data, computer vision may significantly enhance the accuracy, completeness, and adaptability of digital twin models [Zhou et al., 2022].

One of its key contributions is improving data availability, particularly in scenarios where traditional sensors may fall short. For instance, in stock management, cameras equipped with object detection algorithms can monitor inventory levels in real-time, automatically counting items in storage bins or pallets. This ensures timely replenishment and prevents production halts due to stock shortages. Additionally, computer vision can track the sequence of operations on the production line, verifying that each step is completed correctly before moving to the next stage. This ensures adherence to standard operating procedures and minimizes errors, thereby enhancing overall process efficiency.

In terms of data quality, computer vision plays a critical role but also faces significant challenges, particularly in ensuring the reliability of its outputs. While it excels at identifying anomalies, inconsistencies, or errors in visual data, the complexity of image analysis can lead to issues such as false detections or incorrect counts during tasks like assembly or packaging. These inaccuracies can result in discrepancies between expected and actual output quantities, potentially causing waste, reduced product reliability, or production bottlenecks. However, these limitations can be mitigated by coupling computer vision with existing sensor technologies for cross-verification, ensuring more accurate results through multiple data sources. Additionally, analyzing continuous video streams instead of individual images enhances data coherence over time, allowing for better tracking of object permanence and consistency. For example, in inventory control, computer vision can reliably monitor stock levels by verifying the presence of objects across frames, reducing the risk of inaccuracies caused by transient occlusions or environmental factors. By leveraging these strategies, manufacturers can significantly improve the robustness and reliability of data generated by computer vision systems, enabling seamless workflow progression and optimized throughput in production environments.

Another critical area where computer vision adds value is data standardization and interoperability [Perno et al., 2022]. By standardizing the extraction of spatial and contextual information from visual data, computer vision facilitates seamless integration with existing digital twin frameworks. For example, visual data from multiple sources, such as cameras and drones, can be unified into a single format, ensuring compatibility across different systems and platforms. Additionally, video streams provide multi-semantic data from a single source, such as inventory levels and processing times, which improves synchronization and avoids data alignment issues, thus strengthening interoperability and simplifying data management in complex manufacturing environments.

Real-time data processing is another strength of computer vision, which is essential for maintaining synchronization between the physical and virtual environments. By continuously scanning the production environment and generating updated 3D point cloud representations, computer vision allows for incremental and automated updates to the digital twin model [Soori et al., 2023]. This ensures that changes in the physical system are promptly reflected in the virtual model, supporting real-time decision-making and operational optimization. For instance, monitoring the duration of tasks on the production line helps identify inefficiencies or delays. If a particular workstation consistently takes longer than expected, this information can be used to adjust workflows or allocate additional resources. Predictive analytics combined with computer vision can also forecast potential slowdowns or stoppages, enabling manufacturers to proactively add operators to specific workstations to maintain smooth production flow.

Finally, data privacy and security are safeguarded through the integration of computer vision with advanced machine learning techniques [Fuller et al., 2020]. These technologies enable the digital twin to learn from visual data while adhering to strict privacy protocols, minimizing the risk of unauthorized access or cyber threats. Additionally, edge computing solutions can be employed to process sensitive data locally, further enhancing security and compliance. By addressing these critical data challenges, computer vision empowers manufacturers to create more robust, accurate, and responsive digital twins. This not only improves the efficiency and effectiveness of manufacturing processes but also drives innovation and competitiveness in the industry.

Despite its transformative potential in addressing data-related challenges for digital twins in manufacturing, implementing computer vision remains a complex task. Developing reliable algorithms demands significant expertise, high-quality training

data, and advanced computational resources. Additionally, ensuring compatibility with existing systems and safeguarding data privacy introduces further complications. One of the key challenges is whether computer vision processing can truly provide high-quality and reliable data. The accuracy of extracted visual data is crucial, as poor-quality data can lead to incorrect model predictions, misinterpretations, and reduced decision-making effectiveness. In the following section, we present our case study on creating a digital twin for a tidal turbine production line, where we explore the specific challenges encountered during model training and discuss the strategies implemented to overcome them.

4 Analyzing Data Acquisition Challenges for Digital Twins: A Case Study in Tidal Turbine Production

The development of accurate and reliable CV data treatment for digital twins hinges on overcoming key data acquisition challenges, such as limited data availability, annotation complexity, and privacy concerns. To systematically explore these challenges, we conducted an in-depth analysis through a real-world case study: the creation of a digital twin for a tidal turbine production system. In this section, we introduce the case study and delve into the two approaches we tested to address the development of CV algorithm. Additionally, we propose a mixed approach to overcome the problems of the two methods.

4.1 Introduction to the Case Study

Our research focuses on the development of a Digital Twin for the production system of a tidal turbine, implemented within the Operations Management (OM) platform at Grenoble INP. This setup provides a realistic industrial environment for the implementation and evaluation of Digital Twin solutions, offering a controlled yet dynamic space to test and refine the proposed approaches.

The primary objective of our Digital Twin is to manage and monitor production operations effectively. To do so, it must be able to recognize various patterns and states of the product throughout the assembly and sub-assembly phases. Thus, we aimed at developing an accurate and reliable digital representation of the physical system, which requires seamless integration of data.

The creation of an accurate CV processing tool involves several key steps, including data acquisition, processing, modeling, and integration, leveraging state-of-the-art machine learning algorithms like YOLOv8 and Faster R-CNN [Hussain, 2024]. Among these, the model training phase plays a pivotal role, as it determines the accuracy and reliability of the object detection system. A well-trained model ensures that the Digital Twin can effectively interpret real-world data, enabling precise monitoring and decision-making capabilities. Without robust training, the Digital Twin may fail to capture critical details, leading to potential inaccuracies in its representation of the physical system.

As a foundational step in the development of the Digital Twin, we employed computer vision techniques to perform object detection of the tidal turbine within the production environment. Object detection is a critical task that enables the tracking and analysis of the product at various stages of the assembly process. To achieve this, the object detection model must be trained to recognize and classify specific components or states of the tidal turbine accurately. This requires a structured workflow consisting of several key steps:

1. Data collection: Gathering images from the production environment to capture the tidal turbine and its components under various conditions.
2. Data Annotation: Labeling the collected images to create a labeled dataset by assigning appropriate class labels to train the deep learning model effectively.
3. Model Training: Training the model using the annotated data. During this phase, the model learns to associate visual patterns in the images with their corresponding class labels. to detect and classify the tidal turbine accurately.
4. Model Validation: Assessing the trained model's performance using a separate validation dataset to ensure accuracy and reliability.
5. Inference: Deploying the model in a real-world production environment to detect and monitor the tidal turbine in real time.

The object detection process adopted in this study is illustrated in (**Figure 2**), which includes the key phases of data collection, annotation, model training, validation, and inference.

To achieve accurate object detection results, we investigated two distinct data acquisition approaches. The first approach involved Real Data Collection, where we gathered authentic data directly from physical experiments conducted in the tidal turbine assembly workshop. The second approach utilized Synthetic Data Generation, which entailed creating 2D images using CAD models of the tidal turbine to replicate diverse scenarios and variations.

Figure 2. Object Detection Process Workflow

4.2 First Approach using Real Data Collection

The first approach involved collecting real-world data by capturing high-resolution videos from various workstations within the tidal turbine production environment. These workstations included assembly, disassembly, and sub-assembly operations, where different components of the turbine were handled. High-resolution cameras were strategically positioned across the production floor to capture the assembly process from multiple angles in real-time.

After collecting the video data, frames were extracted using a custom Python script and manually annotated using the

Roboflow platform. The resulting dataset comprised 370 annotated images, divided into 324 for training, 31 for validation, and 15 for testing. This labeled dataset was used to train a YOLOv8 object detection model on Google Colab. However, this approach posed several challenges:

- Annotation Complexity: The intricate nature of the tidal turbine components made manual annotation an arduous and time-consuming task. Each image contained multiple detailed parts that required precise labeling, leading to a labor-intensive process. Furthermore, the dataset of 370 annotated images proved to be insufficient for training deep learning models like YOLOv8, resulting in low detection accuracy due to the limited volume and diversity of the training data.
- Privacy Concerns: Capturing video data in a real-world workshop environment introduced privacy issues, as operators and staff members were often visible in the footage. Ensuring compliance with data privacy regulations required the application of anonymization techniques to blur or obscure identifiable personnel, adding an additional layer of complexity to the data processing workflow.
- Resource Intensiveness: The overall process of real data collection, annotation, and model training demanded considerable time and effort. The manual annotation step, in particular, was resource-intensive, making it difficult to scale the dataset effectively within a reasonable timeframe. Additionally, maintaining consistent data quality across different recording sessions posed further challenges.

In **Figure 3**, we present an inference result from the model trained on controlled real-world data. The model demonstrates the ability to recognize the target objects and generate bounding boxes around them. However, the detection suffers from low precision, with several inaccurate or imprecise predictions, indicating limitations in the model's robustness when applied to real industrial scenes.

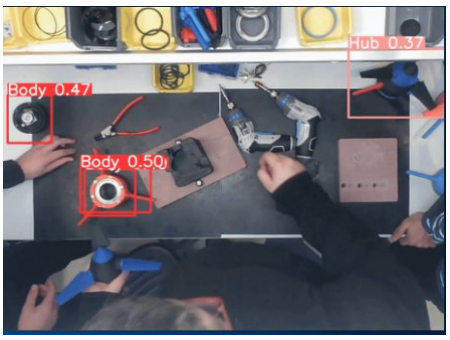


Figure 3. Inference of the model trained on real data

4.3 Second Approach using Synthetic Data Generation

To overcome the limitations encountered with real data collection, a synthetic data approach was adopted to supplement and enhance the training dataset. This approach leveraged CAD models of the tidal turbine components to generate 2D images with variations in object attributes such as colors, combinations, rotations, and positions. By introducing these controlled modifications, the synthetic data aimed to increase the diversity of training samples while minimizing the manual effort required for data annotation. Synthetic data plays a crucial role in computer vision tasks by augmenting datasets and ensuring sufficient variability, which contributes to improved model robustness and performance[Cohen et al., 2020].

Using custom Python scripts, 2D images were generated from the CAD models of the tidal turbine components. These scripts allowed for the automatic creation of diverse scenarios by altering object configurations. This automation enabled the rapid creation of large datasets with minimal human intervention. Additionally, the synthetic dataset, comprising 1,306 annotated images (1,206 for training, 50 for validation, and 50 for testing), was efficiently labeled using the Roboflow platform. Unlike real data, where manual annotation is labor-intensive, synthetic data annotation was significantly accelerated through automated labeling, ensuring consistent and error-free annotations across the entire dataset.

Despite its numerous advantages, the synthetic data approach faced a significant challenge:

- Challenges of Data Gap: Although the synthetic data provided a diverse and extensive training set, models trained exclusively on synthetic images exhibited poor performance when applied to real-world scenarios. This issue arises due to the domain gap (data gap), which refers to the discrepancy between the distributions of synthetic and real data. As synthetic images are generated in controlled environments, they often fail to capture critical real-world variations such as lighting changes, reflections, occlusions, and manufacturing inconsistencies [Zhu et al., 2023]. This gap hinders the generalization capability of the trained models, limiting their effectiveness in real production environments.

In **Figure 4**, we show the inference output of the model trained on synthetic data and tested on real-world video frames. In this case, the model fails to correctly recognize the target object in the scene, revealing a significant domain gap between the synthetic and real data. This result highlights the challenge of direct transfer from synthetic training to real-world deployment without adaptation.

Figure 4. Inference of the model trained on synthetic data

The comparison of the real data and synthetic data collection approaches, including their respective workflows and challenges, is illustrated in **(Figure 5**), providing a visual representation of the methodologies employed in our study.

In summary, while the synthetic data approach provided a scalable and efficient alternative to real data collection, it presented challenges in model generalization due to the data gap. These findings highlighted the need for a hybrid approach that combines real and synthetic data to leverage the strengths of both methods and improve overall model performance in real-world conditions.

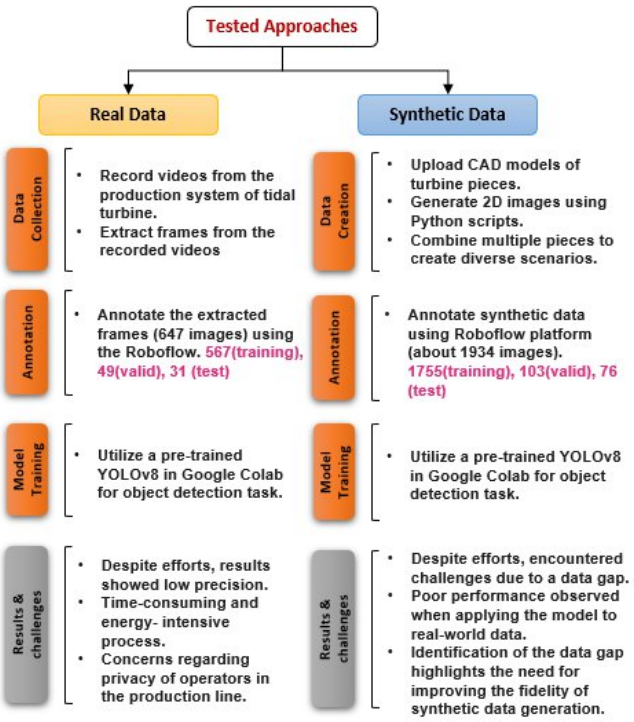


Figure 5. Comparison of Real and Synthetic Data Collection Approaches

4.4 Proposed Solution: Mixed Data Approach

To overcome the limitations observed in both real and synthetic data approaches, The mixed data approach is proposed to create a comprehensive dataset that enhances model performance and generalization. This hybrid strategy aims to leverage the strengths of multiple data sources while addressing their respective shortcomings. It incorporates three complementary types of data, each contributing unique benefits to the dataset and improving the overall robustness of the trained models.

4.4.1 Spontaneous Real Data:

Spontaneous real data refers to the data obtained by selecting specific video sequences from the real data collected in the first approach, where operators are either not visible or anonymization techniques, such as face blurring, are applied to ensure compliance with privacy regulations. This type of data provides authentic insights into real production scenarios while addressing privacy concerns related to capturing human presence. By focusing on naturally occurring processes, spontaneous real data captures the inherent variability of real-world operations, making it an essential component for training models that need to perform in dynamic environments.

4.4.2 Controlled Real Data:

To ensure a structured and consistent dataset, the controlled real data approach utilizes a high-resolution camera mounted on a collaborative robot (cobot) to capture videos of tidal turbine components arranged in predefined static configurations. The cobot is programmed to record the scenarios and combinations of components in a controlled environment, ensuring uniform conditions such as lighting, camera angles, and positioning. This method facilitates the creation of a high-quality dataset by minimizing variability and enhancing the model's ability to accurately learn object features.

4.4.3 Synthetic Data:

Synthetic data is planned to be generated using Unity-based simulation environments or diffusion models, enabling the creation of auto-labeled images featuring controlled variations in object orientation, scale, and placement. This approach is expected to allow for rapid dataset expansion while maintaining high annotation accuracy and flexibility in introducing diverse scenarios.

The following table (Table 1) summarizes the challenges faced in the data acquisition phase and the corresponding solutions proposed to address them:

Table 1. Challenges and Solutions in Data Collection

Challenges	Proposed Solutions
Annotation complexity	Semi-automated annotation using fine-tuned YOLO models
Privacy concerns	Anonymization techniques (face blurring) and selective data acquisition
Data insufficiency	Combination of real and synthetic data for enhanced model training
Data gap issues	Mixed data approach to bridge the synthetic-real data performance gap
Resource-intensive process	Utilizing controlled environments and automated annotation tools

4.5 Object Detection Sim2Real Pipeline for Digital Twin Integration

The goal of the proposed approach is to support the development of robust deep learning models for the implementation of the digital twin within the S.MART Operations Management platform. This DT aims to integrate visual information with operational data to enable key functionalities such as workstation scheduling, object tracking across production stages, and process optimization. To effectively perform object detection in this industrial context, we need to address the domain gap between synthetic and real-world data. To this end, we will adopt a sequential fine-tuning strategy: models will first be fine-tuned using controlled real-world data, and then further fine-tuned using synthetic data. This strategy is expected to enhance the model's generalization ability, enabling it to perform effectively when applied to real industrial videos during inference.

5 CONCLUSION AND PERSPECTIVES

In this study, we explored the challenges of digital twin creation with a focus on data acquisition and integration, highlighting the role of computer vision as a key enabling technology.

Two approaches were tested for data collection, real-world data acquisition and synthetic data generation, each with its own advantages and limitations. Real data, while offering high authenticity and relevance, posed challenges related to manual annotation complexity and privacy concerns. Conversely, synthetic data generation allowed for scalable and diverse datasets but struggled with the domain gap issue, affecting the model's ability to generalize to real-world scenarios.

Based on these findings and the limitations observed, our next objective is to develop a comprehensive dataset using a mixed-data approach that combines three types of data: spontaneous real data collected from assembly operations, controlled real data obtained through structured experiments with predefined object configurations, and synthetic data generated using simulation tools to introduce diverse variations. This mixed

approach is expected to overcome the limitations of the individual approaches by leveraging the strengths of each data type, ultimately improving the accuracy and reliability of digital twin models. The goal is to train computer vision models with this enriched dataset to support various digital twin functions, such as object detection, action recognition, anomaly detection, and process tracking, thereby enhancing the system's ability to monitor, analyze, and optimize manufacturing processes.

Moving forward, efforts will focus on refining data collection strategies, optimizing annotation processes through semi-automated techniques, and validating the effectiveness of the trained models in real-world manufacturing environments. Addressing interoperability challenges and ensuring seamless integration with existing industrial systems will also be critical to achieving the full potential of digital twin technology.

6 Acknowledgment

This work has been funded by the UNITE! university Network, supported by the European Union, and supported by the French National Research Agency in the framework of the "Investissements d'avenir" program (ANR-15-IDEX-02).

7 References

Chirumalla, K. (2021). Building digitally-enabled process innovation in the process industries : A dynamic capabilities approach. Technovation, 105, 102256. https://doi.org/10.1016/j.technovation.2021.102256

Cohen, J., Crispim-Junior, C. F., Grange-Faivre, C., & Tougne, L. (2020). CAD-based Learning for Egocentric Object Detection in Industrial Context. 15th International Conference on Computer Vision Theory and Applications, 5, 644-651. https://doi.org/10.5220/0008975506440651

Ettalibi, A., Elouadi, A., & Mansour, A. (2024). AI and Computer Vision-based Real-time Quality Control : A Review of Industrial Applications. Procedia Computer Science, 231, 212-220. https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.12.195

Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital Twin : Enabling Technologies, Challenges and Open Research. IEEE Access, 8, 108952-108971. IEEE Access. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358

Hussain, M. (2024). Sustainable Machine Vision for Industry 4.0 : A Comprehensive Review of Convolutional Neural Networks and Hardware Accelerators in Computer Vision. AI, 5(3), Article 3. https://doi.org/10.3390/ai5030064

Jaber, A., Koufos, I., & Christopoulou, M. (2025). A Comprehensive State-of-the-Art Review for Digital Twin : Cybersecurity Perspectives and Open Challenges. In L. Barolli (Éd.), Advances on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing (p. 78-98). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-76462-2_8

Liu, M., Fang, S., Dong, H., & Xu, C. (2021). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. Journal of Manufacturing Systems, 58, 346-361. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017

O'Connell, E., O'Brien, W., Bhattacharya, M., Moore, D., & Penica, M. (2023). Digital Twins : Enabling Interoperability in Smart Manufacturing Networks. Telecom, 4(2), Article 2. https://doi.org/10.3390/telecom4020016

Omrany, H., Al-Obaidi, K. M., Husain, A., & Ghaffarianhoseini, A. (2023). Digital Twins in the Construction Industry : A Comprehensive Review of Current Implementations, Enabling Technologies, and Future Directions. Sustainability, 15(14), Article 14. https://doi.org/10.3390/su151410908

Perno, M., Hvam, L., & Haug, A. (2022). Implementation of digital twins in the process industry : A systematic literature review of enablers and barriers. Computers in Industry, 134, 103558. https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103558

Sharma, A., Kosasih, E., Zhang, J., Brintrup, A., & Calinescu, A. (2022). Digital Twins : State of the art theory and practice, challenges, and open research questions. Journal of Industrial Information Integration, 30, 100383. https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100383

Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E. P., Qiao, Y., Murray, N., & Devine, D. (2021). Digital Twin : Origin to Future. Applied System Innovation, 4(2), Article 2. https://doi.org/10.3390/asi4020036

Sommer, M., Stjepandić, J., Stobrawa, S., & Soden, M. von. (2023). Automated generation of digital twin for a built environment using scan and object detection as input for production planning. Journal of Industrial Information Integration, 33, 100462. https://doi.org/10.1016/j.jii.2023.100462

Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2023). Digital twin for smart manufacturing, A review. Sustainable Manufacturing and Service Economics, 2, 100017. https://doi.org/10.1016/j.smse.2023.100017

Varadharajan, V., & Bansal, S. (2016). Data Security and Privacy in the Internet of Things (IoT) Environment. In Z. Mahmood (Éd.), Connectivity Frameworks for Smart Devices : The Internet of Things from a Distributed Computing Perspective (p. 261-281). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-33124-9_11

Wang, J., Zhang, W., Shi, Y., Duan, S., & Liu, J. (2018). Industrial Big Data Analytics : Challenges, Methodologies, and Applications (arXiv:1807.01016). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.1807.01016

Wu, H., Ji, P., Ma, H., & Xing, L. (2023). A Comprehensive Review of Digital Twin from the Perspective of Total Process : Data, Models, Networks and Applications. Sensors, 23(19), Article 19. https://doi.org/10.3390/s23198306

Zhang, Y., & Thorburn, P. J. (2022). Handling missing data in near real-time environmental monitoring : A system and a review of selected methods. Future Generation Computer Systems, 128, 63-72. https://doi.org/10.1016/j.future.2021.09.033

Zhou, X., Xu, X., Liang, W., Zeng, Z., Shimizu, S., Yang, L. T., & Jin, Q. (2022). Intelligent Small Object Detection for Digital Twin in Smart Manufacturing With Industrial Cyber-Physical Systems. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 18(2), 1377-1386. https://doi.org/10.1109/TII.2021.3061419

Zhu, X., Bilal, T., Mårtensson, P., Hanson, L., Björkman, M., & Maki, A. (2023). Towards Sim-to-Real Industrial Parts Classification With Synthetic Dataset. 4454-4463. https://openaccess.thecvf.com/content/CVPR2023W/VISION/html/Zhu_Towards_Sim-to-Real_Industrial_Parts_Classification_With_Synthetic_Dataset_CVPRW_2023_paper.html

Zribi, H., Elloumi, A., Hani, Y., & Elmhamedi, A. (2023). Industry 4.0 : Digital Twin's Industrial Applications. 2023 9th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), 1086-1091. https://doi.org/10.1109/CoDIT58514.2023.10284310

CIGI QUALITA MOSIM 2025

Prediction of the Remaining Useful Life of Rolling Bearings: A Machine Learning-Based Approach

ABDELHAK ELIDRISSI[1], SALEM NAFIRI[2]

[1] Rabat Business School, International University of Rabat
Rabat, Morocco
abdelhak.elidrissi@uir.ac.ma

[2] Department of Mathematics Computer Science and Geomatics, Hassania School for Public Works
Casablanca, Morocco
nafiri@ehtp.ac.ma

***Abstract* – Predictive maintenance is essential for minimizing downtime and optimizing the performance of critical industrial systems. In this study, we propose a machine learning-based approach to predict the Remaining Useful Life (RUL) of rolling bearings, a critical component of phosphate rock grinding mills. Unlike traditional methods that rely on vibration data, our approach leverages operational data, including phosphate tonnage, phosphate quality, hours of operation, and cumulative metrics. Two predictive models were developed: Multiple Linear Regression (MLR) and Artificial Neural Networks (ANN). Experimental results demonstrate the potential of ANN-based models to enable precise RUL predictions, facilitating proactive maintenance scheduling and reducing unplanned downtime. The proposed approach is cost-effective, utilizes existing historical data, and can be extended to other industrial equipment and defect types.**

***Keywords* – Machine Learning, Multi-Layer Perceptron, Neural Network, Multiple Linear Regression, Remaining Useful Life, Prognostic.**

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Un Cadre pour la Sélection de la Solution NLP Optimale pour des Tâches de Classification de Texte dans l'Industrie 4.0

MATHIEU BOURDIN[1,2], ANAS NEUMANN[3,4], THOMAS PAVIOT[5], ROBERT PELLERIN[3,4], SAMIR LAMOURI[1,2]

[1] *LAMIH CNRS/UNIVERSITE POLYTECHNIQUE HAUTS-DE-FRANCE*
59313 Valenciennes Cedex 9, France
mathieubourdin@eurofins.com

[2] ARTS ET METIERS INSTITUTE OF TECHNOLOGY
151 boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris, France

[3] CIRRELT
2920 chemin de la Tour, pavillon André Aisenstadt, bureau 3520, 11290 Montréal, Canada

[4] POLYTECHNIQUE MONTREAL
2500 Chemin de Polytechnique Montréal, 11290 Montréal, Canada

[5] MEEDIA
15 rue Glais Bizoin, 35000 Rennes, France

***Résumé* – La classification de texte est essentielle dans l'industrie pour exploiter efficacement les vastes volumes de données textuelles non structurées disponibles : rapports de maintenance, d'incidents, retours clients, brevets, sites internet. Les outils de Traitement Automatique du Langage Naturel (TALN) permettent d'automatiser cette tâche, évitant un traitement manuel chronophage de ces données. Cet article propose un cadre méthodologique pour sélectionner et adapter les solutions NLP selon les caractéristiques des données et les contraintes organisationnelles.**

Une revue des outils NLP existants est présentée, suivie de critères de sélection (explicabilité, besoins en calcul, disponibilité des données). Des stratégies de personnalisation via la vectorisation, le prétraitement et l'ajustement des modèles sont abordées, ainsi que des techniques d'optimisation des hyperparamètres. L'article met également en évidence les défis d'adoption des modèles de langage dans les PME et propose une méthodologie pragmatique pour orienter leur choix. Cette contribution vise à faciliter l'intégration de solutions NLP adaptées aux contextes industriels spécifiques.

Ce travail vise à simplifier l'adoption des outils NLP dans un contexte industriel, en particulier pour les PME, en leur fournissant une méthodologie claire pour choisir et personnaliser la solution adaptée à leurs besoins.

***Mots clés* – Traitement Automatique du Langage Naturel (TALN), Industrie 4.0, Modèles de Langage, Grands Modèles de Langage**

***Abstract* – Text classification is crucial in industrial contexts, where large volumes of unstructured textual data—such as maintenance reports, incident logs, and customer feedback—hold significant analytical potential. Natural Language Processing (NLP) tools provide an efficient means of processing this data, overcoming the limitations of manual methods. This article proposes a framework to guide the selection and adaptation of NLP solutions for classification tasks in industry, taking into account data characteristics, organizational constraints, and business objectives. It reviews existing NLP tools, defines key selection criteria (e.g., explainability, computational requirements, and data needs), and explores customization strategies through vectorization techniques, preprocessing, and fine-tuning. The framework also provides guidance on optimizing hyperparameters and adapting models to specific industrial use cases. This work aims to simplify the adoption of NLP tools in tailored industrial applications.**

***Keywords* – Natural Language Processing (NLP), Industry 4.0, Language Models, Large Language Models**

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Optimisation adaptative des processus multiproduits : une approche basée sur l'XAI

MUSTAPHA BELMOUADDEN[1,2,3], CAMÉLIA DADOUCHI[1,2,3], ROBERT PELLERIN[2,3]

[1] Laboratoire en Intelligence des Données (LID), Montréal, 100190, Québec, Canada
mustapha.belmouadden@polymtl.ca

[2] Department of Mathematics and Industrial Engineering, Polytechnique Montréal, 2500, chemin de Polytechnique, Montréal, H3T 1J4, Québec, Canada

[3] Centre Interuniversitaire de Recherche sur les Réseaux d'Entreprise, la Logistique et le Transport (CIRRELT), Montréal, Québec, Canada

***Résumé* – L'optimisation adaptative des processus de fabrication multiproduits permet de réduire les arrêts imprévus et d'améliorer la productivité. Cependant, malgré leur impact significatif sur la rentabilité des usines, ces arrêts restent encore peu étudiés dans les environnements industriels à grande échelle. Les recherches existantes ne parviennent pas facilement à expliquer de manière claire et précise comment ces arrêts sont liés aux caractéristiques du processus de fabrication, telles que les paramètres des machines, les conditions environnementales (température, humidité) ou les spécifications des matériaux utilisés. Dans ce contexte, nous proposons un modèle adapté de la méthodologie CRISP-DM, intégrant une section d'explicabilité, afin d'établir la relation entre les arrêts imprévus causés par le non-respect des spécifications et les variables caractérisant un processus. En exploitant des données issues de processus de fabrication complexes, notre modèle a permis d'identifier 66 % des produits responsables de micro-arrêts liés à des non-conformités. L'approche explicable utilisée ne se limite pas à détecter ces relations, mais permet également d'orienter les décisions en fournissant aux opérateurs des leviers d'action concrets. Cette solution ouvre ainsi la voie à un ajustement dynamique des paramètres ajustables du processus de fabrication, en fonction des conditions observées, afin de limiter les arrêts et d'optimiser la productivité. Ce travail illustre le potentiel des approches basées sur la valorisation des données industrielles pour renforcer la résilience des systèmes de production multiproduits face aux perturbations imprévues.**

***Abstract* – Adaptive optimization of multi-product manufacturing processes helps reduce unplanned downtimes and improve productivity. However, despite their significant impact on factory profitability, these downtimes remain largely understudied in large-scale multi-product industrial environments. Existing research struggles to clearly and precisely explain how these disruptions are related to the input variables of the manufacturing process, such as machine parameters, environmental conditions (temperature, humidity), or material specifications. In this context, we propose a tailored CRISP-DM-based model incorporating an explainability component to establish the relationship between unplanned downtimes—caused by non-compliance with specifications—and input variables. By leveraging data from complex manufacturing processes, our model successfully identified 66% of the products responsible for micro-downtimes linked to non-conformities. The explainable approach employed detects these relationships and facilitates decision-making by providing operators with actionable insights. This solution paves the way for the dynamic adjustment of tunable process parameters based on observed conditions, thereby mitigating downtimes and optimizing productivity. This work highlights the potential of data-driven industrial analytics approaches to enhance the resilience of multi-product manufacturing systems against unforeseen disruptions.**

***Mots clés* - Fabrication, Disponibilité des machines, Intelligence artificielle explicable, Apprentissage automatique, CRISP-DM.**
***Keywords* – Manufacturing, Machine availability, Explainable Artificial Intelligence, Machine Learning, CRISP-DM.**

1 INTRODUCTION

Dans un contexte marqué par une inflation élevée et des perturbations des chaînes d'approvisionnement, les entreprises font face à une augmentation des coûts de production. Pour relever ces défis, il est crucial d'identifier et d'atténuer les pertes, notamment en réduisant les temps d'arrêt considérés comme le principal facteur d'inefficacité selon la littérature [1]. Wolniak et al. [2] classent ces arrêts en cinq catégories : prévus (pauses, nettoyage), imprévus (manque de composants), pannes mécaniques prolongées, micro-pannes (arrêts courts sans maintenance) et arrêts de conversion (changement d'équipement ou de paramètres). Ces arrêts affectent la disponibilité et les performances des machines [11].

La réduction des temps d'arrêt est cruciale pour améliorer la disponibilité et l'efficacité des processus industriels. Cependant, les temps d'arrêt mineurs non planifiés, qui nécessitent des ajustements de paramètres et qui surviennent

en raison d'un non-respect des spécifications techniques lors de la production sont rarement étudiés. Une approche prometteuse consiste à exploiter les données historiques pour modéliser les relations entre la conformité et les paramètres influents, qu'ils soient ajustables ou non. Cette approche englobe des domaines tels que l'intelligence artificielle, les métaheuristiques et la logique floue. Elle permet un traitement avancé des connaissances par le biais de systèmes auto-organisés et interactifs, alliant apprentissage à partir des données et expertise humaine [12]. Ces systèmes offrent une représentation riche et flexible des connaissances, une acquisition dynamique des informations et une capacité d'inférence.

Reconnaissant ce besoin industriel, l'objectif de cet article est de développer un modèle prédictif permettant d'évaluer la conformité des produits dès les premières étapes d'un processus d'assemblage. L'approche proposée vise à identifier et à quantifier les contributions spécifiques de chaque variable d'entrée à la qualité finale des produits, offrant ainsi un cadre explicatif rigoureux et scientifiquement fondé. Le modèle a été développé pour une entreprise fabricant une grande variété de pneus.
La suite de l'article est organisée ainsi. La section 2 fournit tout d'abord une revue sommaire des travaux visant l'optimisation des processus industriels. La section 3 présente ensuite la méthodologie proposée. Les résultats obtenus sont exposés dans la section 4. Enfin, la section 5 conclut en discutant les implications de l'approche proposée pour la détection précoce des non-conformités et l'identification des causes sous-jacentes des micro-arrêts.

2 TRAVAUX CONNEXES

L'application de diverses méthodes associées au Lean Manufacturing a permis d'obtenir des améliorations significatives en matière d'efficacité et de qualité des processus. Henríquez-Alvarado et al. [13] mettent en évidence l'efficacité de l'implantation des techniques 5S, de la cartographie de la chaîne de valeur et du cycle Planifier-Exécuter-Vérifier-Agir (PDCA) pour éliminer les activités sans valeur ajoutée, réduire les temps de cycle et améliorer la qualité des processus.

Dans le même ordre d'idées, Nwanya et al. [14] ont mené un suivi régulier des temps d'arrêt, permettant de réduire ces interruptions et d'augmenter de manière significative le taux de production. Si la majorité des travaux dans ce domaine abordent principalement les temps d'arrêt planifiés, les arrêts mineurs non planifiés, souvent associés au non-respect des spécifications des produits durant le processus, semblent recevoir moins d'attention [16]. Ces interruptions constituent pourtant une opportunité notable d'amélioration de la productivité par leur réduction.

Dans la pratique, les paramètres des processus de production sont souvent définis de manière conservatrice par des experts, suivant une approche itérative jusqu'à atteindre une combinaison garantissant la conformité du produit sans nécessairement viser l'optimum [15]. Cette stratégie peut limiter la productivité et augmenter les coûts. Elle met ainsi en évidence la nécessité de développer des méthodes d'optimisation des paramètres de processus permettant de concilier productivité, réduction des coûts et maintien de la conformité des produits.

Traditionnellement, l'optimisation repose sur des approches statiques où les paramètres sont fixés lors de la conception du produit [5]. Cependant, ces méthodes sont peu adaptées aux variations des conditions opérationnelles, pouvant entraîner des écarts par rapport aux paramètres initialement estimés comme optimaux et compromettant ainsi la stabilité et la performance des processus.

Une autre approche consiste en l'identification dynamique des paramètres optimaux des processus de production. Cette approche vise à garantir une adaptation continue aux variations des conditions opérationnelles, tout en évitant les interruptions causées par des ajustements correctifs.
Dans ce contexte, bien que les approches traditionnelles de gestion des paramètres conservent leur pertinence, elles doivent être complétées par des stratégies dynamiques et adaptatives capables d'anticiper les perturbations et de s'adapter aux contraintes industrielles. Une intégration des approches de fouille de données dans le secteur manufacturier apparaît alors comme une piste prometteuse pour analyser en amont les interruptions imprévues et identifier leurs causes profondes.

En s'appuyant sur l'exploitation des données de production, cette étude vise à développer un modèle capable de prévoir ces interruptions et de proposer des ajustements proactifs des paramètres de processus, contribuant ainsi à la réduction des arrêts non planifiés et à l'amélioration globale de la performance industrielle.

3 METHODOLOGIE

Une adaptation du Processus Standard Intersectoriel pour la Fouille de Données (CRISP-DM) a été élaborée afin de mieux répondre aux défis spécifiques liés aux données industrielles et d'intégrer les connaissances contextuelles en ingénierie. Cette version conserve les cinq premières phases du cadre original, mais exclut la phase de déploiement qui ne s'inscrit pas dans le champ de cette recherche focalisée sur l'analyse, l'interprétation et l'évaluation des données. Une composante consacrée à l'explicabilité des résultats a été ajoutée afin de garantir une prise de décision plus transparente et fiable en milieu industriel. Le processus actualisé est présenté à la Figure 1.

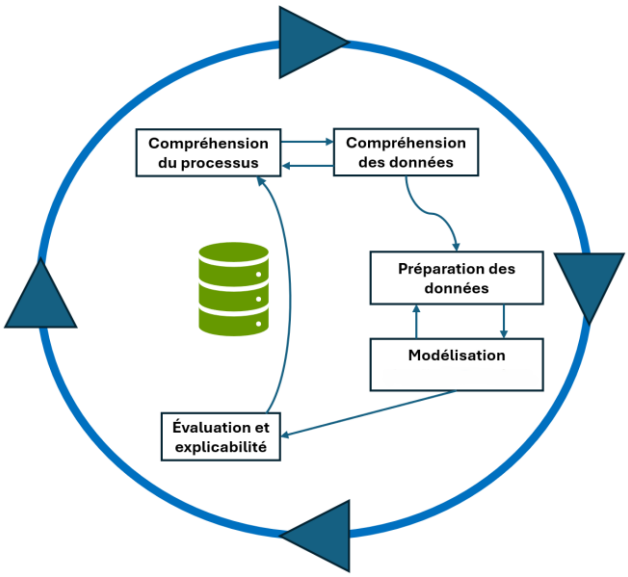


Figure 1. Méthodologie adaptée de CRISP-DM

3.1 Compréhension du processus

La première phase consiste à comprendre le contexte de l'entreprise, avec un accent particulier sur le processus identifié comme critique. Cette étape permet d'identifier les contraintes opérationnelles et d'estimer les bénéfices potentiels de la valorisation des données.

3.2 Compréhension des données

Cette phase consiste à examiner les données disponibles pour leur exploration, tout en tenant compte du processus étudié dans le contexte de la production. Wang [21] propose une typologie des paramètres à considérer dans la valorisation des données, incluant les variables de produit, de machine, de processus de fabrication, de matières premières, d'opérateur, environnementales, de ligne de production, de planification, de contrôle qualité, de service, de chaîne d'approvisionnement et de cibles.

L'utilisation de la visualisation pour améliorer la compréhension des données est une méthode couramment employée dans la littérature. Divers types de représentations graphiques permettent de comparer des données, d'identifier des tendances ou de détecter des anomalies. Ces visualisations constituent un outil essentiel pour appréhender efficacement les données disponibles et les préparer à une exploitation ultérieure [9]. Les visualisations de données permettent également d'estimer leur qualité de manière préliminaire, en mettant en évidence les erreurs et en aidant à en identifier les origines possibles.

3.3 Préparation des données

Le prétraitement des données est l'étape la plus cruciale et la plus chronophage du processus de valorisation des données. Conformément à la méthodologie CRISP-DM, cette phase comprend diverses tâches essentielles telles que le nettoyage des données, la correction des erreurs, l'encodage, la normalisation, ainsi que la création de nouvelles caractéristiques, entre autres.

Un accent particulier est mis sur l'encodage des données catégoriques, en raison de la présence d'attributs comportant un grand nombre de catégories distinctes.

3.4 Modélisation

L'objectif est d'élaborer une solution sur mesure pour les processus de fabrication multiproduits, en intégrant l'expertise du domaine. Cette méthode équilibre la généralisation et les particularités associées aux produits ou aux machines, tout en révélant des motifs tels que les arrêts-machines ou les regroupements liés à la maintenance, ce qui permet d'améliorer les performances des modèles.
Une segmentation adaptée des données permet d'adapter les modèles d'apprentissage automatique aux spécificités industrielles en tenant compte des différences entre machines, produits ou conditions de production. Cependant, une segmentation mal définie peut induire des biais. Pour atténuer ces effets, il est essentiel de coupler la segmentation à une validation croisée, cela améliore la robustesse des modèles et limite le surapprentissage, garantissant des prédictions fiables malgré des données limitées ou déséquilibrées.

L'optimisation des hyperparamètres permet d'explorer systématiquement l'espace de ces paramètres afin de maximiser les performances des modèles [10].

3.5 Évaluation et explicabilité

La validation doit être adaptée aux objectifs spécifiques de l'étude, en particulier pour les ensembles de données déséquilibrés. Des métriques telles que la précision, le rappel et le F1-score offrent une évaluation plus pertinente que la précision seule, notamment pour mesurer la capacité du modèle à détecter des classes rares, mais essentielles.

Une fois le modèle validé, l'intégration de l'intelligence artificielle explicable (XAI) est cruciale pour garantir la conformité des prédictions aux connaissances opérationnelles, renforçant ainsi la confiance dans les solutions d'IA. L'explicabilité, obtenue par des techniques spécifiques ou indépendantes du modèle, améliore la compréhension de son comportement en contexte industriel.

4 EXPERIMENTATION

Cette étude de cas porte sur une entreprise du secteur des pneumatiques. Nous y détaillons les différentes étapes de la méthodologie proposée, mises en œuvre dans ce contexte industriel.

4.1 Compréhension du processus

Le processus d'assemblage des pneus est fréquemment interrompu par des arrêts non planifiés, principalement dus à des non-conformités détectées en cours de production. Actuellement, ces arrêts nécessitent des ajustements manuels des paramètres ou des corrections sur l'assemblage, ce qui entraîne une réduction de la productivité et de la disponibilité des machines. Une meilleure compréhension des causes de ces arrêts permettrait d'optimiser le processus et de limiter ces interruptions. L'analyse des données issues de la production vise à identifier les facteurs influençant ces arrêts et explorer des stratégies d'ajustement plus efficaces, réduisant ainsi l'impact des interventions correctives sur le flux de production.

Les données utilisées proviennent des bases de données de notre partenaire industriel. Elles couvrent l'ensemble des enregistrements des machines automatiques utilisées durant l'année 2023, de janvier à décembre, incluant les sections d'assemblage et de matriçage. La section de matriçage fournit des informations détaillées sur l'état des rouleaux de nappes de ceinture, éléments essentiels du processus d'assemblage.

4.2 Compréhension des données

La phase de collecte et de compréhension des données constitue une étape clé du processus d'analyse, car elle permet d'identifier les variables influençant l'assemblage des pneus, qu'elles soient contrôlables ou non. Cette étape repose sur une documentation et une analyse approfondie du processus afin de sélectionner les paramètres pertinents pour la modélisation.

Afin de garantir une analyse ciblée, certains paramètres non directement liés à la production ont été exclus, notamment ceux relevant de la planification, du service et de la chaîne d'approvisionnement. De même, les informations sur les opérateurs en service ne sont pas prises en compte.

La Figure 2 illustre les différentes catégories et sous-catégories de variables à prendre en compte lors de l'exploration des données industrielles, en précisant le contenu associé à chacune d'entre elles. Ces variables se divisent principalement en deux types : **les variables ajustables,** comprenant notamment les paramètres de calibrage, et **les variables non ajustables**, telles que les variables environnementales.

CATÉGORIE DE VARIABLES	SOUS-CATÉGORIES	AJUSTABLE?
PRODUIT	Les caractéristiques de chaque pneu (largeur, diamètre, etc.)	Non
	Informations sur les rouleaux utilisés dans l'assemblage (identifiant, durée de production, date de génération et de consommation)	
PRODUCTION	L'historique de production de chaque pneu.	Non
	Les pressions appliquées pendant l'assemblage	Oui
	Les ajustements de longueurs effectués	Oui
ENVIRONNEMENT	La température dans la zone d'assemblage	Non
	L'humidité dans la zone d'assemblage	Non
CIBLE	L'état de conformité de chaque pneu	Non

Figure 2: Catégories de variables de fabrication

Parmi ces variables, la conformité joue un rôle clé en tant qu'indicateur principal de performance du processus. La présente étude a établi un **indice de conformité** basé sur le respect des spécifications techniques relatives aux trois nappes d'acier et de textile qui composent le pneu. Plus précisément, les longueurs des joints doivent strictement se situer dans les intervalles définis pour chaque produit. Une valeur de « 1 » est attribuée lorsque toutes les tolérances dimensionnelles sont respectées, tandis qu'une valeur de « 0 » est attribuée si au moins une tolérance n'est pas satisfaite.

L'évaluation de la conformité repose sur des mesures précises, ce qui implique de détecter et de traiter efficacement les anomalies potentielles dans les données collectées. Les valeurs des longueurs des joints peuvent parfois être erronées ou aberrantes. Toutefois, l'application d'une approche statistique standard, telle que la méthode des interquartiles, pourrait éliminer des observations pertinentes qui reflètent des non-conformités réelles. Pour éviter cela, l'expertise des spécialistes du domaine a été sollicitée afin d'établir des valeurs limites appropriées garantissant un nettoyage pertinent des données sans perte d'informations critiques.

L'indice de conformité permet de calculer **un taux de conformité** suivi tout au long du processus d'assemblage. Associé au **taux de qualité** mesuré lors de l'inspection finale, ces deux indicateurs constituent des critères essentiels pour évaluer l'efficacité et la robustesse du système de production.

L'analyse des données révèle que lorsque des non-conformités sont détectées au cours du processus d'assemblage, les opérateurs interviennent immédiatement pour effectuer des ajustements en temps réel ou appliquer des actions correctives avant l'inspection finale. Cette approche proactive permet de traiter efficacement les défauts identifiés, empêchant ainsi leur propagation vers les étapes ultérieures de production. Grâce à ce système de contrôle réactif, un **taux de qualité final de 99%** a été atteint.

Cependant, **le taux de non-conformité à l'assemblage reste élevé (21%)**, ce qui constitue un défi majeur. Ces non-conformités sont l'une des principales causes des arrêts et micro-arrêts non planifiés, réduisant la disponibilité des machines et impactant négativement la productivité globale.

Parmi les facteurs influençant la conformité, le changement de rouleau joue un rôle important. La Figure 3 illustre cet impact : les résultats montrent que dans **38 %** des cas, le premier pneu assemblé après un changement de rouleau est jugé non conforme aux spécifications. Intégrer ces variations dans les modèles permet d'anticiper ces événements et optimiser les réglages post-changement. L'intégration de techniques de visualisation avancées aide à détecter des tendances cachées et à explorer de nouvelles variables, améliorant ainsi l'interprétabilité et l'ajustement des paramètres de production.

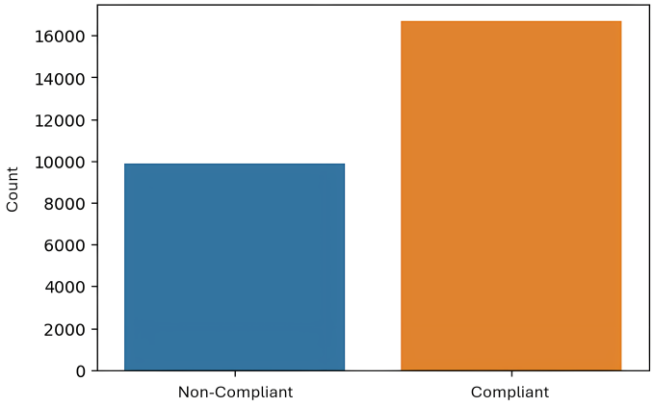


Figure 3 : L'état de conformité du premier pneu de chaque rouleau

4.3 Préparation des données

La préparation des données vise à identifier les variables pertinentes et à les structurer selon les besoins de l'analyse. Des transformations, telles que les pivots, ont été appliquées aux tables des paramètres de produit et de calibrage afin de réorganiser les données et représenter ces paramètres sous forme d'attributs. Chaque observation correspond ainsi à un identifiant unique de pneu.

Après la fusion des différentes tables extraites des bases de données du partenaire industriel, un jeu de données d'environ 3,5 millions d'observations a été constitué. Ce dernier couvre 500 types de produits, chacun avec ses propres paramètres de production et de calibrage.

Les étapes suivantes, essentielles pour assurer la qualité et la pertinence des données avant leur intégration aux modèles :

- **Nettoyage des données :** Les doublons ont été supprimés en se basant sur les identifiants uniques des produits. Pour détecter les valeurs aberrantes, des diagrammes en boîte, en violon et des histogrammes ont été utilisés. Les deux premières méthodes ont permis d'analyser la dispersion des données et de différencier les erreurs de mesure des anomalies propres au processus, garantissant ainsi la conservation des observations pertinentes.

- **Prétraitement des données :** Cette phase à pour but de limiter l'impact des grandes variations d'échelle entre les valeurs des variables. À cet effet, une standardisation des données avant leur intégration dans les modèles est nécessaire. Pour les variables catégoriques et afin de réduire le risque de perte d'information et gérer efficacement les attributs possédant un grand nombre de catégories [6], un encodage Catboost a été choisi. Étant donné que l'ajustement des variables de pression est souvent effectué par les opérateurs par des pas constants, une stratégie de discrétisation des variables de pression a été mise en place. Cette approche consiste à transformer les données continues de pression en catégories discrètes, avec des intervalles de 0,05 bar.
- **La sélection des caractéristiques :** Le nombre de variables peut atteindre plusieurs centaines, rendant l'analyse complexe et affectant la performance des modèles. Une première réduction est effectuée en s'appuyant sur l'expertise du domaine pour ne conserver qu'environ une centaine de paramètres pertinents, suivie d'une élimination des variables redondantes. Dans ce contexte, l'utilisation de techniques comme l'analyse en composantes principales (PCA) n'est généralement pas recommandée pour les données industrielles. Bien que cette méthode permette de remplacer les variables d'origine par des composantes principales qui capturent l'essentiel de la variance des données, l'interprétation des résultats issus des composantes principales peut s'avérer complexe et peu intuitive. Par conséquent, plutôt que de recourir à des transformations telles que PCA, il est souvent plus pertinent d'opter pour des techniques de sélection de caractéristiques qui conservent la signification des variables d'origine. Ces approches permettent de réduire le nombre de variables tout en garantissant leur interprétabilité et leur contribution au modèle final.
- **L'ingénierie des caractéristiques :** Cette phase permet d'intégrer des informations pour l'amélioration du processus d'apprentissage. Dans cette étude, nous proposons de créer des variables qui nous permettront de tester des hypothèses, comme indiqué dans le Tableau 1.
- **Équilibrage des données** : Selon la littérature, un jeu de données est déséquilibré lorsque la classe minoritaire représente moins de 35 % des données [7]. Dans ce projet, la classe minoritaire ne représente que 21 % des données. La technique de pondération des observations a été adoptée pour traiter ce déséquilibre, car elle permet de mieux représenter les classes minoritaires sans modifier la structure des données. Cette approche est plus efficace et moins coûteuse en termes de calcul que le suréchantillonnage, qui peut entraîner un surajustement excessif. La pondération est calculée via la fonction *compute_sample_weight* de la bibliothèque *sklearn.utils* en Python.

4.4 Modélisation

Deux approches de modélisation seront examinées. Les deux approches concernent des modèles de classification visant à prédire l'éventuelle non-conformité d'un pneu. Dans un premier temps, les modèles seront appliqués à l'ensemble des données collectées provenant de l'ensemble des machines considéré comme un modèle de base. Ensuite, Une approche de **clustering** est appliquée pour regrouper les machines présentant des schémas similaires d'arrêts correctifs, d'actions de maintenance ou d'historiques d'utilisation.

Une fois les clusters définis, un **modèle spécifique est entraîné pour chaque groupe** afin de mieux capturer les particularités des schémas d'arrêts correctifs. Cette segmentation permet au modèle de mieux capturer les comportements spécifiques à chaque segment de machines tout en assurant une généralisation efficace à l'ensemble du parc de machines. Il devient possible de mieux comprendre les modes de défaillance récurrents et d'adapter les interventions correctives en fonction des groupes identifiés, plutôt que d'adopter une approche uniforme.

4.5 Evaluation et explicabilité

Le Tableau 2 présente les résultats de la première approche avec le modèle CatBoost, complétés par des options

Tableau 1 : Les attributs créés ou intégrés lors de l'ingénierie des caractéristiques

Hypothèse	Description	Attributs créés ou intégrés
Hypothèse 1	*L'influence des états des produits aux observations n-3, n-2 et n-1 sur le produit à l'instant n*	• Trois colonnes catégoriques enregistrent les codes de retard des pneus précédents aux instants « n-1 », « n-2 » et « n-3 ». • Trois colonnes numériques indiquent la durée des retards pour les pneus aux instants « n-1 », « n-2 » et « n-3 », ainsi que pour le pneu à l'instant « n ».
Hypothèse 2	*L'impact de la température sur le processus d'assemblage*	• Des variables environnementales liées à la température et à l'humidité sont intégrées, conformément aux modèles physiques des matériaux polymères, qui lient ces facteurs à l'élasticité du caoutchouc. • Pour chaque pneu, les températures et humidités moyennes, maximales et minimales du jour de sa production sont enregistrées. • La durée de stockage des matériaux utilisés dans la fabrication du pneu avant leur consommation est calculée et intégrée aux données.
Hypothèse 3	*La succession de non-conformité*	• Une colonne binaire est créée pour identifier les pneus produits après deux pneus non conformes consécutifs.
Hypothèse 4	*La variation de coupage des longueurs*	• Un attribut a été intégré pour documenter la variation entre la longueur du pli entrée par l'opérateur et la longueur mesurée après le coupage, pour donner suite à l'identification de problèmes liés à cette variation.
Hypothèse 5	*Pneus restants à produire sur le rouleau en cours de consommation*	• Un attribut a été ajouté pour spécifier le nombre de pneus restants à produire avec le matériau restant sur le rouleau en cours de consommation

d'optimisation fournies par Optuna [8] et par l'utilisation du weight sampling pour équilibrer la représentation de chaque classe. Les résultats obtenus en combinant l'optimisation des paramètres et l'échantillonnage équilibrent les performances entre la classe minoritaire et la classe majoritaire.

En segmentant les données en blocs et en appliquant une pondération des échantillons, combinée à une optimisation bayésienne des hyperparamètres, les paramètres tels que le nombre d'itérations, le taux d'apprentissage et la profondeur (d) des arbres ont été ajustés. Le nombre de feuilles, déterminé indirectement par la profondeur 2^d, reflète la structure symétrique propre à CatBoost.

Les résultats présentés dans le Tableau 3 montrent que les segments G et H se distinguent par une précision et un F1-score plus élevés, ce qui pourrait s'expliquer par un rapport favorable entre les classes de pneus conformes et non conformes. La variation observée dans les performances des différents segments est liée à la proportion de la classe minoritaire, qui s'établit à *28%, 22%, 21%, 17%, 16% et 15%* pour les blocs *H, G, C, D, J et F*, respectivement.

Tableau 2 : Performance de CatBoost sur l'intégralité des données

Model	Hyper-Paramétrage	Pondération	Accuracy	Re-call		Précision		F1-score	
				Conforme	Non Conforme	Conforme	Non Conforme	Conforme	**Non Conforme**
CatBoost			80	97	17	81	61	88	**29**
	X		70	71	65	88	38	79	**48**
		X	80	97	20	82	63	88	**31**
	X	X	70	72	65	88	39	79	**48**

Tableau 3 : Résultats de CatBoost sur les segments de machine

Segment	Accuracy	Re-call		F1-score		Précision		Itération	Learning rate	Profondeur
		Conf.	Non Conf.	Conf.	Non Conf.	Conf.	Non Conf.			
C	69	70	66	78	49	88	39	781	0.027	9
G	70	71	66	79	50	88	41	550	0.099	9
J	70	71	63	80	39	92	28	508	0.068	6
H	70	72	64	77	55	83	48	588	0.021	10
D	72	74	62	81	43	90	32	644	0.087	8
F	72	74	64	82	43	91	32	661	0.031	7

La Figure 4 représente un graphique d'importance des caractéristiques basé sur le gain pour identifier les causes des micro-arrêts durant le processus d'assemblage. Elle met en évidence l'importance de prendre en compte les pneus précédents pour prédire la conformité du pneu en cours et valide l'hypothèse selon laquelle le paramétrage des longueurs des nappes de carcasse et de l'imperméable joue un rôle crucial. Les facteurs environnementaux, tels que les conditions météorologiques et la durée de stockage des nappes, figurent parmi les caractéristiques les moins influentes. Cette analyse offre aux experts du domaine une compréhension approfondie des facteurs sous-jacents.

5 Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté une méthode visant à prédire les résultats du processus d'assemblage des pneus en fonction des variables d'entrée, telles que les paramètres de processus, les caractéristiques des matériaux et les conditions environnementales opérationnelles. Cette approche exploite les données industrielles pour explorer l'industrie manufacturière numérisée et à grande échelle. Elle repose sur l'utilisation de données hétérogènes (numériques et catégoriques) et sur l'application de techniques d'ingénierie des caractéristiques propres au domaine, permettant de traduire les connaissances métier en données exploitables.

L'objectif principal était d'améliorer la compréhension des relations entre les paramètres de processus et la conformité des pneus assemblés. Cela visait à fournir des informations précieuses aux opérateurs, leur permettant d'ajuster les paramètres des pneus dont la conformité ne respecte pas les caractéristiques techniques. Ces ajustements contribuent à éliminer les arrêts imprévus liés aux corrections nécessaires pendant l'assemblage, ce qui améliore la disponibilité des machines et augmente la productivité globale.

Deux approches ont été développées à l'aide de l'algorithme CatBoost, reconnu pour son efficacité dans le traitement des données catégoriques. La comparaison des résultats montre que l'approche fondée sur les similarités de comportement ou d'action des machines, en s'appuyant sur les historiques de production, offre de meilleures performances. De plus, des techniques d'explicabilité ont été intégrées au modèle afin d'identifier l'importance relative des attributs et de remonter ainsi aux causes principales des micro-arrêts.

La première étape consiste à identifier les attributs responsables des micro-arrêts. Les travaux futurs se concentreront sur l'analyse de l'influence de ces attributs sur la conformité des produits et l'élaboration de stratégies automatiques d'ajustement des paramètres pour atteindre cet objectif. Ces recherches visent à résoudre ce problème et à améliorer significativement la productivité des industries de fabrication à grande échelle.

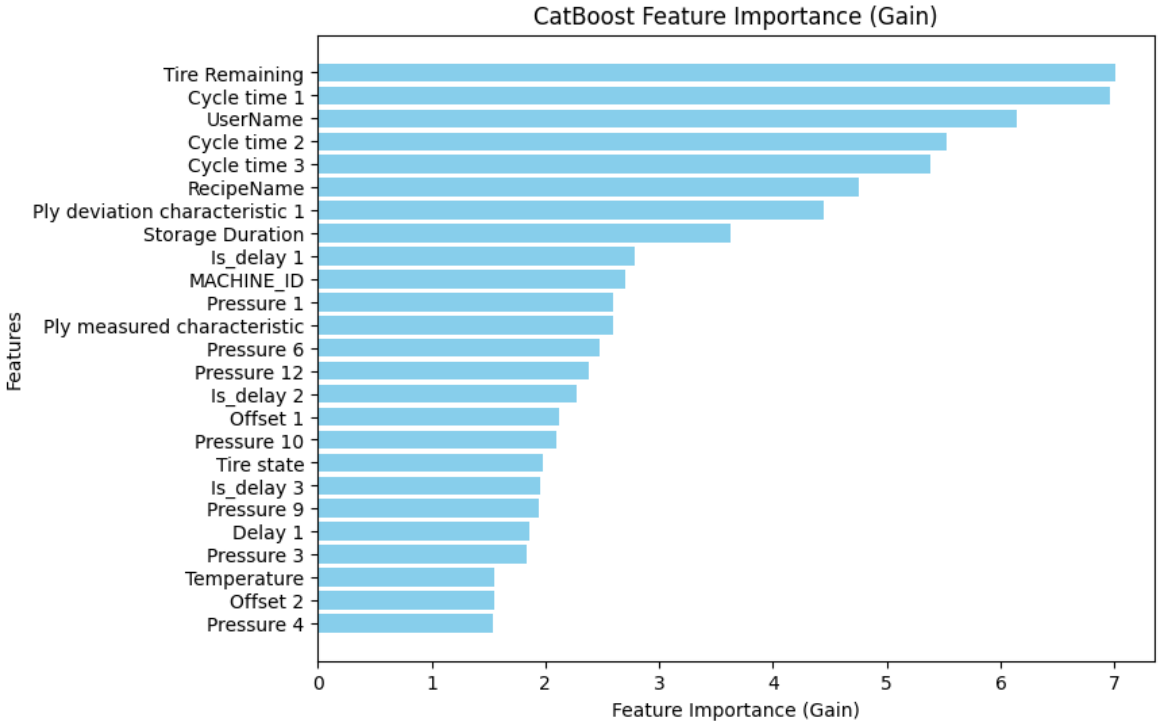


Figure 4 : Importance des attributs basée sur le critère du gain

6 REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent exprimer leur reconnaissance au partenaire industriel de ce travail pour l'accessibilité aux informations et données nécessaires, leur confiance et leur implication dans ce projet. Nous remercions aussi MITACS (projet IT38650) pour le financement de ce projet.

7 REFERENCES

1. Liu, J., Chang, Q., Xiao, G., & Biller, S. (2012). The costs of downtime incidents in serial multistage manufacturing systems.
2. Wolniak, R. (2019). Downtime in the automotive industry production process–cause analysis. Quality Innovation Prosperity, 23(2), 101-118.
3. Peghini, N., Zignoli, A., Gandolfi, D., Rota, P., & Bosetti, P. (2021, January). Real-Time Cross-Dataset Quality Production Assessment in Industrial Laser Cutting Machines. In *International Conference on Pattern Recognition* (pp. 490-505). Cham: Springer International Publishing.
4. Guo, F., Zhou, X., Liu, J., Zhang, Y., Li, D., & Zhou, H. (2019). A reinforcement learning decision model for online process parameters optimization from offline data in injection molding. *Applied Soft Computing*, *85*, 105828.
5. Yin, X., Niu, Z., He, Z., Li, Z. S., & Lee, D. (2020). An integrated computational intelligence technique based operating parameters optimization scheme for quality improvement oriented process-manufacturing system. *Computers & Industrial Engineering*, *140*, 106284.
6. Prokhorenkova, L., Gusev, G., Vorobev, A., Dorogush, A. V., & Gulin, A. (2018). CatBoost: unbiased boosting with categorical features. *Advances in neural information processing systems*, *31*.
7. Li, H., & Sun, J. (2012). Forecasting business failure: The use of nearest-neighbour support vectors and correcting imbalanced samples–Evidence from the Chinese hotel industry. *Tourism Management*, *33*(3), 622-634.
8. Akiba, T., Sano, S., Yanase, T., Ohta, T., & Koyama, M. (2019, July). Optuna: A next-generation hyperparameter optimization framework. In *Proceedings of the 25th ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery & data mining* (pp. 2623-2631).
9. Yuan, J., Chen, C., Yang, W., Liu, M., Xia, J., & Liu, S. (2021). A survey of visual analytics techniques for machine learning. *Computational Visual Media*, *7*, 3-36.
10. Feurer, M., & Hutter, F. (2019). Hyperparameter optimization. *Automated machine learning: Methods, systems, challenges*, 3-33.
11. Ljungberg, Õ. (1998). Measurement of overall equipment effectiveness as a basis for TPM activities. *International Journal of Operations & Production Management*, *18*(5), 495-507.
12. Dote, Y., & Ovaska, S. J. (2001). Industrial applications of soft computing: a review. *Proceedings of the IEEE*, *89*(9), 1243-1265.
13. Henríquez-Alvarado, F., Luque-Ojeda, V., Macassi-Jauregui, I., Alvarez, J. M., & Raymundo-Ibañez, C. (2019, September). Process optimization using lean manufacturing to reduce downtime: Case study of a manufacturing SME in Peru. In *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial and Business Engineering* (pp. 261-265).
14. Nwanya, S. C., Udofia, J. I., & Ajayi, O. O. (2017). Optimization of machine downtime in the plastic manufacturing. *Cogent Engineering*, *4*(1), 1335444.
15. Silbernagel, C., Aremu, A., & Ashcroft, I. (2020). Using machine learning to aid in the parameter optimisation process for metal-based additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, *26*(4), 625-637.
16. Guendon, M., Dadouchi, C. et Agard, B. (2023) Exploration des processus pour l'évaluation des pertes de cadence. Dans CIGI Qualita MOSIM 2023, Trois-Rivières, Québec, Canada.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Méthode de modélisation de la propagation de maladies infectieuses dans un environnement intérieur

CLARA INGHELS[1,4], CATHERINE DA CUNHA[1], EMMANUELLE BILLON-DENIS[2], AURELIE TRIGNOL[3], AUDREY DUCLOS[4], CLEMENT BEGHIN[4]

[1] Nantes Université, Ecole Centrale Nantes, CNRS, LS2N, UMR 6004
Nantes, France

[2] Direction Générale de l'Armement
Vert-Le-Petit, France

[3] Institut de Recherche Biomédicale des Armées
Brétigny-sur-Orge, France

[4] Naval Group
Lorient, France

clara.inghels@ls2n.fr

Résumé

L'épidémie de Covid-19 fut une crise majeure rappelant que l'émergence et la réémergence de maladies infectieuses peuvent avoir un impact significatif sur nos sociétés. Cet article concerne la modélisation mathématique dans la prévention des épidémies en se concentrant sur leur propagation à bord des navires militaires. Ces environnements intérieurs clos sources de promiscuité peuvent conduire à la formation de clusters infectieux menaçant la mission opérationnelle. Il est crucial d'évaluer et mettre en place des solutions préventives et protectrices techniques, architecturales ou organisationnelles. Pour cela des modèles à l'échelle des bâtiments prenant en compte les comportements individuels et la contribution de la dynamique des flux d'air à la transmission par voie aérienne des maladies sont nécessaires mais absents du spectre des modèles épidémiologiques habituels. Cet article établit la méthode et les choix de conception d'un outil de simulation spécifique pour l'évaluation de l'architecture d'un navire face aux risques biologiques et d'évaluation de la contribution des solutions implémentées à la maîtrise d'une épidémie. La méthode couple un modèle à base d'agents (ABM) et un modèle de dynamique des fluides (CFD) pour représenter les phénomènes participant à la transmission des maladies que sont les comportements individuels et la dynamique des flux d'air.

Abstract

The Covid-19 outbreak was a major crisis reminding us that the emergence and re-emergence of infectious diseases can have a significant impact on public health and our societies. The theme of this article is mathematical modeling for epidemic prevention, focusing on the spread of epidemics aboard naval vessels. Naval vessels, as enclosed, promiscuous indoor environments, can become actual clusters threatening the availability of forces. It is crucial to assess and implement prevention and protection solutions, whether technical, architectural or organizational. This requires building-scale models that take into account individual behaviors and the contribution of airflow dynamics to the transmission of pathogens through the air, these are absent from the spectrum of epidemiological models though. This article sets out the method and choices involved in designing a specific simulation tool for assessing a ship's architecture against biological risks, and evaluating the contribution of the solutions implemented to contain an outbreak. The method couples an agent-based model (ABM) and a computational fluid dynamics (CFD) model to represent the phenomena involved in disease transmission, i.e. individual behavior and airflow dynamics.

Mots clés **- modélisation, méthode, maladie infectieuse, CFD, ABM.**
Keywords **– simulation, method, infectious disease, CFD, ABM.**

1 INTRODUCTION

L'émergence et la réémergence de nombreuses maladies infectieuses au cours des dernières décennies, ont contraint les chercheurs à intensifier leurs efforts dans le domaine de la modélisation mathématique des maladies infectieuses [Sweileh, 2022]. On citera notamment les épidémies de variole s'étendant sur plus de trois millénaires, maladie considérée éradiquée en 1980 par l'OMS [Bland et al., 1980], celle du sida causée par le VIH, virus identifié en 1983 [Fauci, 1999],

celles d'Ebola touchant particulièrement les pays d'Afrique [Gostin et al., 2014], celle de la Covid-19 dont l'urgence sanitaire mondiale a été levée par l'OMS le 5 mai 2023 [Velavan & Meyer, 2020], ou plus récemment la réémergence de la maladie Mpox (anciennement appelé variole simienne) déclarée pour la seconde fois comme urgence de santé publique de portée internationale en août 2024 [Ndembi et al., 2025]. Ces flambées épidémiques n'épargnent pas les navires qui constituent un endroit privilégié pour la formation de clusters infectieux de par la promiscuité des usagers à bord, l'environnement intérieur clos favorisant le recyclage de l'air et l'accès limité aux soins [Bourlet, 2023]. Les conséquences de la formation de tels clusters infectieux sont d'autant plus importantes lorsqu'elles touchent les navires militaires remettant en cause la poursuite de la mission opérationnelle comme ce fut le cas à bord du porte-avions Charles de Gaulle en avril 2020 lors de la crise Covid-19 [Meynard et al., 2022]. La propagation d'agents infectieux à bord pouvant atteindre l'ensemble de l'équipage dans un temps très court est considérée comme une défaillance par mode commun c'est-à-dire une agression se manifestant de manière rapide provoquant l'incapacité de l'équipage à accomplir une tâche et cela sans préavis suffisant lui permettant de réagir. C'est pourquoi il est nécessaire d'étudier l'impact de la propagation des agents infectieux à bord et d'évaluer des solutions de prévention et de protection avant de les mettre en œuvre pour limiter le risque d'épidémie. Les méthodes de modélisation et de simulation permettraient d'estimer l'efficacité de ces solutions, techniques, architecturales ou organisationnelles, en étudiant la propagation des maladies au sein de l'équipage en fonction des habitudes des marins à bord et de l'architecture du navire.

L'objectif de l'outil de simulation développé dans cet article est d'évaluer l'architecture de l'environnement intérieur d'un navire face aux risques biologiques dans un premier temps, puis d'évaluer la contribution des solutions implémentées à l'amélioration de la maîtrise d'une épidémie à bord. La méthode de modélisation employée dans la conception de l'outil permet le couplage d'un modèle des comportements individuels dit à base d'agents (ABM) et d'un modèle des flux d'air dit de la dynamique des fluides numérique (CFD). Cela répondant aux fonctions d'estimation du risque de survenue d'une épidémie et d'évaluation des potentielles contre-mesures. Après avoir décrit les mécanismes en jeu dans la dynamique des maladies infectieuses ainsi que les modélisations utilisées en épidémiologique mathématique, la méthode et les choix de modélisation seront développés avant de conclure sur la programmation et la validation de l'outil de simulation.

2 CONTEXTE

2.1 Emergence et réémergence des maladies infectieuses

Les agents pathogènes sont définis comme des micro-organismes (les bactéries, les virus, les parasites et les champignons), pouvant provoquer des maladies chez l'homme ou chez l'animal. Les maladies émergentes et réémergentes peuvent être définies comme des infections causées par de nouveaux agents pathogènes ou par des maladies déjà connues qui réapparaissent. Elles peuvent résulter d'une transmission depuis un réservoir animal, d'une nouvelle mutation génétique acquise par le microorganisme, ou d'une expansion géographique de sa zone de distribution. Ces agents biologiques peuvent ainsi devenir plus contagieux, plus virulents ou résistants aux traitements disponibles [Institut Pasteur, 2024]

La dynamique des maladies infectieuses dépend de l'interaction entre trois facteurs que sont l'hôte, l'agent biologique et l'environnement (Figure 1). L'émergence ou la réémergence d'une maladie peut intervenir lors de modifications d'un de ces trois éléments entrainant l'augmentation de la transmission et de l'incidence de la maladie et menant à l'épidémie [Collège des universitaires de Maladies Infectieuses et Tropicales, 2023].

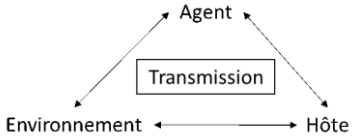


Figure 1 : Les trois éléments fondamentaux de la dynamique des maladies infectieuses.

De nombreux déterminants favorisent l'émergence ou la réémergence de maladies. Ils peuvent être environnementaux, tels que le changement climatique, l'évolution démographique ou encore la mondialisation des échanges ; intrinsèques des agents pathogènes tels que la contagiosité, la survie hors hôte, la résistance aux agents anti-infectieux ; ou relatif à l'hôte comme la résistance à l'infection induite par l'état de santé de l'individu ou son statut vaccinal.

La transmission d'un agent infectieux peut s'effectuer suivant différents modes de transmission dont différentes classifications existent. Le Centers for Disease Control and Prevention discrimine la transmission par voie aérienne (inhalation et dépôt direct sur les muqueuses de particules respiratoires infectieuses), de la transmission directe (hors transmission par voie aérienne, habituellement manuportée), de la transmission indirecte (par un contact avec un objet intermédiaire, par véhicule commun ou par vecteur) [WHO, 2024]. Ainsi, une infection respiratoire comme la Covid-19 peut se transmettre notamment par la voie aérienne à travers des particules en suspension dans l'air émises par un individus infectieux tandis que les infections à transmission féco-orale comme les gastro-entérites ne peuvent se transmettre que lors de contacts directs, le plus souvent manuportés. Les véhicules communs de maladies sont des réservoirs inertes comme l'eau, les sols ou les aliments. Les vecteurs peuvent être, entre-autres, des animaux (*e.g.* rongeurs) ou des insectes (*e.g.* arthropodes).

2.2 Domaine maritime militaire

Le domaine maritime militaire impose de nombreuses contraintes pour maintenir la mission opérationnelle. Le navire ainsi que son équipage se doivent d'être disponibles et opérationnels en tout temps de la mission. La propagation d'une épidémie à bord entraine la défaillance de l'équipage qui, dans le pire des cas, est contraint d'arrêter la mission [Meynard et al., 2022]. Les navires représentent des milieux favorables à la propagation de certaines maladies infectieuses notamment les maladies se transmettant par contact direct ou par voie aérienne. Cela est dû à la promiscuité générée par l'environnement clos que représente le navire en partie, au recyclage de l'air intérieur pouvant être contaminé et à l'accès limité aux soins. L'architecture des navires, de ses locaux et coursives, dont la taille est restreinte ne permet pas de distanciation suffisante entre les individus à bord. La ventilation naturelle des navires militaires est très limitée, d'autant qu'ils ne disposent que de très peu d'ouvertures vers l'extérieur et que la circulation de l'air dépend essentiellement du système ventilation, chauffage, climatisation d'air (VCCA) et du recyclage de l'air ambiant. Cette notion de recyclage de

Tableau 1 : Caractéristiques des modélisations

	Applications	Hypothèses	Logiciels	Avantages	Inconvénients
Modèle compartimental	- Epidémiologie macroscopique - Etudes rétrospectives - Modélisation des stratégies de vaccination - Prévisions de l'évolution de l'épidémie	- Population de grande taille - Homogénéité de l'écoulement de l'air - Population homogène	- R - MatLab - Python	- Applicable à tous les modes de transmission - Temps de calculs	- Pas de dimension géospatiale - Dispersion des contaminants dans l'air non prise en compte pour la transmission aérienne
ABM	- Epidémiologie microscopique et macroscopique - Modélisation des stratégies de distanciation - Prévisions de l'évolution de l'épidémie	- Homogénéité de l'écoulement de l'air	- Python - Gama - Netlogo - MassMotion - Odigo - AnyLogic	- Applicable à tous les modes de transmission - Dimension géospatiale - Population hétérogène	- Temps de calculs - Dispersion des contaminants dans l'air non prise en compte pour la transmission aérienne
Modèle CFD	- Epidémiologie microscopique - Modélisation des stratégies de ventilation- Prévisions de l'évolution de l'épidémie	- Quantité de particules excrétées par les individus	- AnsysFluent - OpenFOAM - SolidWorks flow Simulation	- Modélisation de la dispersion des contaminants dans l'air - Dimension géospatiale	- Temps de calculs - Applicable uniquement aux maladies à transmission par voie aérienne notamment par inhalation de particules respiratoires infectieuses

l'air est d'autant plus vraie pour les sous-marins qui sont complétement hermétiques à l'environnement extérieur lorsqu'en immersion sous-marine.

Il est à noter que les navires, complexes composés de nombreux locaux, représentent des lieux de travail (salle des machines, postes d'opération, etc.) et de vie (cuisine, cabines, sanitaires, etc.) pour les marins embarqués. La transmission de maladies entre individus peut s'effectuer en tout lieu et tout instant de la durée de la mission variant de quelques jours à plusieurs mois. Par exemple, le porte-avions Charles de Gaulle peut accueillir environ 2000 personnes sur 82 800m², et l'équipage d'un sous-marin lanceur d'engin comprend 110 individus sur 138m de long pour 12,5m de diamètre.

2.3 Modélisations mathématiques

En épidémiologie mathématique, la genèse de la modélisation des maladies infectieuses remonte aux travaux de la variolisation initiés par le mathématicien, physicien et médecin suisse Daniel Bernoulli en 1760 [Schlienger, 2022]. Les modèles fondateurs sont les modèles compartimentaux créés dès 1927 par Kermack et McKendrick [Kermack & McKendrick, 1927] et le modèle de la transmission aéroportée des maladies infectieuses proposés par Wells et Riley en 1955 [Wells, 1955].

Les modélisations numériques pour l'étude de la propagation des maladies infectieuses ont été utilisées par la communauté de chercheurs en réponse aux limitations des études expérimentales de par leur fiabilité et faible coût. Ces modélisations remplissent principalement trois fonctions. Premièrement, il est possible de caractériser les maladies infectieuses (*e.g.* contagiosité, durée d'incubation) en analysant les données épidémiologiques recueillies lors d'études rétrospectives. Par exemple, un modèle dose-réponse proposé par Buonanno *et al.* a été utilisé pour estimer rétrospectivement la probabilité d'infection de deux épidémies de Covid-19 bien documentées, dans un restaurant en Chine et au sein d'une chorale aux Etats-Unis [Buonanno et al., 2020]. Une méthode différente (modèle compartimental) a également permis d'estimer le taux de transmission de maladies infectieuses telles qu'Ebola ou le SARS [Mubayi et al., 2021].

Deuxièmement, ces outils peuvent servir à prédire l'impact potentiel de différentes interventions de santé publique sur l'évolution des maladies infectieuses. Cela est particulièrement utile pour aider les autorités sanitaires à rationaliser l'utilisation de ces mesures préventives en évaluant leurs impacts en conditions réelles pour adapter leurs utilisations. Un modèle dit à base d'agents a ainsi permis de quantifier les effets de différentes stratégies de fermeture des écoles face à une épidémie de grippe [Lee et al., 2010] et un modèle compartimental déterministe a pu être utilisé durant la pandémie de Covid-19 [Kassa et al., 2020].

Troisièmement, ces outils peuvent aider à prédire et prévenir la survenue des prochaines épidémies comme le modèle multi-agents évaluant les effets de l'architecture intérieure de bureaux dans la propagation de futur agents pathogènes [Lee et al., 2023].

Le Tableau 1 résume les principales caractéristiques des types de modélisations.

2.3.1 Modèles compartimentaux

Les modélisations actuelles de la transmission des maladies infectieuses sont fondées essentiellement sur les modèles épidémiologiques macroscopiques (à l'échelle des populations ou groupe d'individus), dont les plus utilisées sont les différentes variantes du modèle compartimental SIR (Susceptible - Infected -Recovered) développé par Kermack et McKendrick dès 1927 [Kermack & McKendrick, 1927]. Le principe du modèle compartimental consiste à diviser la population en classes épidémiologiques, appelées compartiments, entre la classe des individus susceptibles d'être infectés, celle des individus infectieux et celle des individus retirés du modèle. Plus largement utilisé, le modèle compartimental SEIR s'adjoint la classe des individus exposés au modèle compartimental SIR. Ces modèles sont des outils utiles dans la compréhension des épidémies et l'évaluation des contremesures [Dong et al., 2022].

2.3.2 Modèles à base d'agents

La modélisation à base d'agents (ABM) permet de rendre compte des comportements individuels en simulant les contacts entre chaque individu, leurs comportements et interactions. Cette modélisation individu-centré permet de

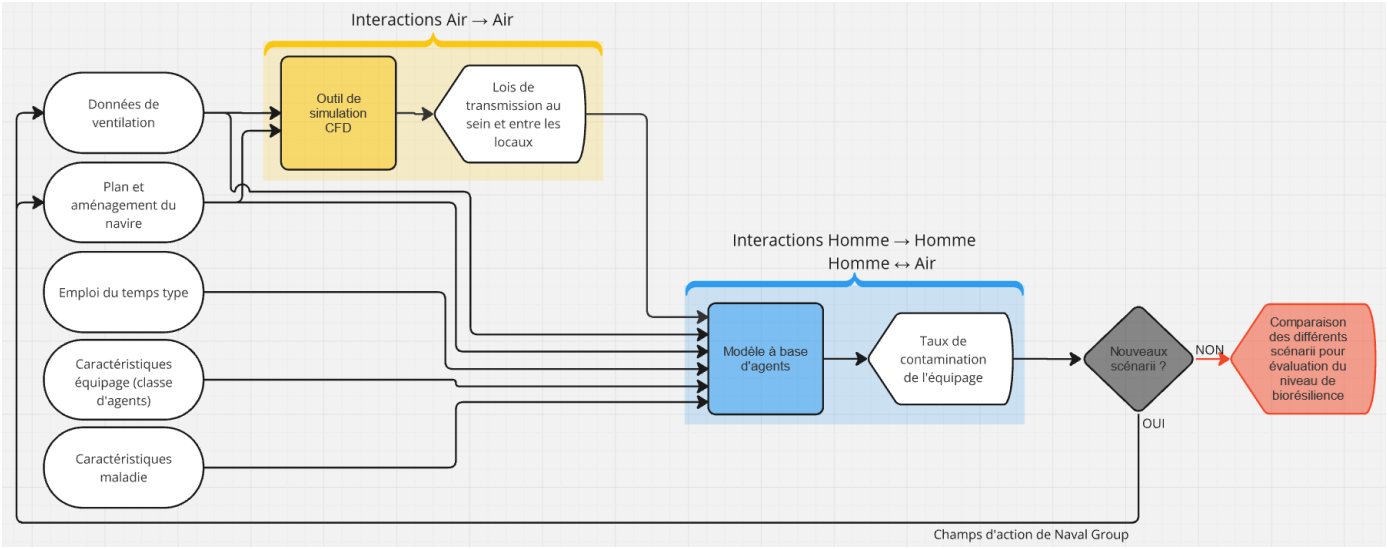


Figure 2 : Schéma de concept de l'outil de simulation

Les ovales représentent les données d'entrée de l'outil, les carrés les modélisations et les pentagones les données de sortie.

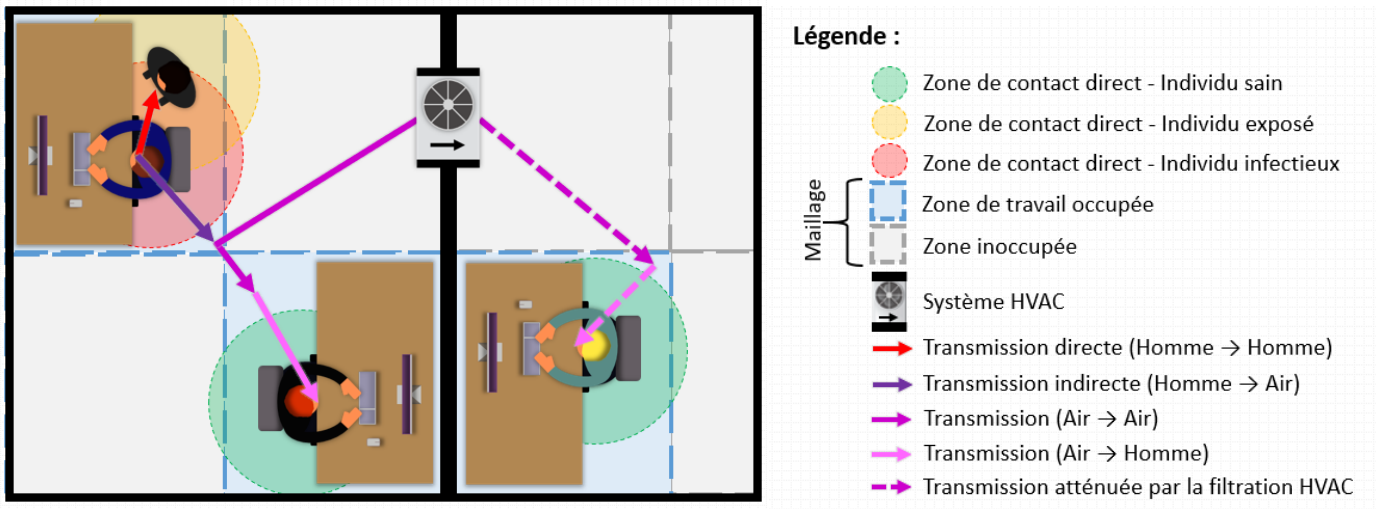


Figure 3 : Schéma des quatre principes de transmission

modéliser la propagation des maladies à l'échelle microscopique des individus (*e.g.* hôpitaux, universités) et macroscopique de groupe d'individus (*e.g.* régions, pays) grâce à leur composante spatio-temporelle. Ils se fondent sur deux processus en jeu dans les mécanismes de la transmission des maladies à savoir la fréquence et la nature des contacts entre individus. Contrairement aux modèles compartimentaux, les ABM sont capables de fournir une description détaillée d'une situation épidémiologique, en particulier lorsque les données sont imprécises et insuffisantes [Krivorotko et al., 2022].

2.3.3 Modèles CFD

Les modélisations de la dynamique des fluides numérique (CFD) sont utilisées dans l'étude des écoulements de l'air et de la dispersion des particules respiratoires infectieuses (*i.e.* les agents pathogènes) sous l'effet de la ventilation, des courants d'air et des obstacles en prenant en compte différents facteurs environnementaux tels que la température ou l'hygrométrie. Ces modélisations s'appliquent donc spécifiquement aux maladies à transmission par voie aérienne dans différents contextes comme les espaces clos, les systèmes de ventilation, les transports publics, les environnements extérieurs, etc. et permettent d'outrepasser l'hypothèse d'homogénéité de l'écoulement de l'air formulée pour les modélisations compartimentales ou à base d'agents. Les études de CFD permettent de tester différentes stratégies de contrôle de la propagation des particules infectieuses par les systèmes de ventilation, l'utilisation des purificateurs d'air ou même les comportements humains (niveau d'activité respiratoire et oratoire) en fonction des caractéristiques intrinsèques des agents biologiques lorsqu'elles sont connues [Mohamadi & Fazeli, 2022].

2.4 Défis et lacunes

Malgré l'essor des modèles pour l'étude de la propagation des maladies infectieuses, des défis et lacunes demeurent dans la recherche dans le domaine. Les modèles épidémiologiques macroscopiques ne prennent pas en compte les schémas de mobilités des individus ni l'hétérogénéité dans leurs interactions et dans la transmission de la maladie. Romero *et al.* soulignent que l'utilisation de l'espace par les piétons à une échelle microscopique n'est pas explicitée par les modèles actuels, ce qui rend difficile l'évaluation de l'impact d'une mesure de distance sociale à l'échelle d'un bâtiment [Romero et al., 2020]. Un autre défi de l'évaluation des stratégies de distanciation est l'hypothèse d'homogénéité de l'air supposée pour le calcul du risque d'infection alors qu'il est reconnu que l'air à l'intérieur des bâtiments n'est pas uniforme [Derjany et al., 2020] [Wang et al., 2022]. L'hétérogénéité de la probabilité de transmission entre les individus n'est bien

souvent pas prise en compte ce qui entre en contradiction avec la réalité [Msmali et al., 2023]. Trop peu de modèles prennent en compte la multitude de voies de transmission d'un agent pathogène et se concentrent bien souvent sur un seul mode de transmission. La validation des modèles constitue un réel défi à cause de l'accès limité aux données expérimentales. Löhner *et al.* estiment que des programmes d'expérimentation sont nécessaires pour compléter et valider les méthodes numériques et établir les lignes directrices en matière de « bonnes pratiques » [Löhner et al., 2022].

3 METHODE DE MODELISATION

L'objectif de l'outil de simulation est d'évaluer l'architecture de l'environnement intérieur d'un navire face aux risques biologiques dans un premier temps, puis d'évaluer la contribution des solutions implémentées à l'amélioration de la maîtrise d'une épidémie à bord. La méthode de modélisation employée dans la conception de l'outil permet le couplage d'un modèle des comportements individuels ABM et d'un modèle des flux d'air CFD. Cela répondant aux fonctions d'estimation du risque de survenue d'une épidémie et d'évaluation des potentielles contre-mesures.

3.1 Concept

L'outil de simulation relève d'une recherche transdisciplinaire entre les domaines de la modélisation et simulation de systèmes industriels, intervenants dans la conception et réalisation de l'outil ; les domaines militaires et de la conception navale, intervenants pour l'application et l'utilisation de l'outil ; et les domaines de la biologie, la médecine et l'épidémiologie, intervenants dans les phénomènes modélisés. Des travaux préliminaires ont été menés et sont en cours de validation par des experts dans les domaines en lien avec la transmission des maladies infectieuses (épidémiologie et infectiologie) afin de déterminer les hypothèses de base et les caractéristiques inéluctables à prendre en compte dans la conception et la création de l'outil de simulation. D'après les résultats de l'analyse de risques biologiques à bord des navires [Inghels et al., 2024], l'outil se concentre sur la modélisation des voies de transmission les plus impactantes à bord à savoir, la transmission par voie aérienne (inhalation et dépôt direct de particules respiratoires infectieuses) et la transmission directe manuportée. Au vu des objectifs et des mécanismes entrant en jeu dans la dynamique des maladies infectieuses et des voies de transmission sélectionnées pour la modélisation, l'outil de simulation se doit de modéliser les interactions entre individus et leurs comportements afin de rendre compte de la voie de transmission directe. Il se doit aussi de modéliser la dynamique des flux d'air sous l'effet de la ventilation à l'intérieur du navire pour transcrire la transmission par voie aérienne notamment par inhalation de particules respiratoires infectieuses. Ces phénomènes sont modélisables par l'utilisation d'une modélisation à l'échelle microscopique des individus. A l'échelle microscopique, la modélisation ABM permet la prise en compte des comportements individuels, des contacts et des interactions entre individus. Les écoulements de l'air dans les milieux intérieurs clos que représentent les navires sont pris en compte par l'utilisation d'une modélisation de type CFD pour la propagation des maladies infectieuses par voie aérienne. Le modèle CFD sert à prendre en compte les flux d'air et se défaire de l'hypothèse d'homogénéité de l'air supposée par les modèles ABM. Il convient alors de coupler ces deux types de modélisation pour répondre à l'objectif : la modélisation ABM permettrait de rendre compte de la transmission directe manuportée et par dépôt direct des particules respiratoires infectieuses et la modélisation CFD modéliserait la transmission par inhalation des particules respiratoires infectieuses (Figure 2). Le couplage est effectué par les données de sortie du modèle CFD servant de données d'entrée pour le modèle ABM. D'autres données d'entrée sont nécessaires à l'outil de simulation : les caractéristiques de la ventilation à bord, le plan du navire et son aménagement, l'emploi du temps type et les caractéristiques organisationnelles de l'équipage (nombre de membres, grades et rôles, lieu de vie affecté…) et les données caractérisant la maladie étudiée si le pathogène a pu être bien caractérisé (période d'incubation, modes de transmission, contagiosité…) (Figure 2). Le modèle CFD permettrait d'établir des lois de transmissions entre des zones au sein d'un même local et entre les locaux du navire. Les zones sont identifiées lorsque les caractéristiques des flux d'air sont similaires. Ces zones servent à construire le maillage du navire pour le modèle ABM. Dans le modèle ABM, les individus et les zones sont considérées comme des « agents » (entités au sens de la modélisation à base d'agents) qui présentent des caractéristiques relatives à un niveau de contamination par les particules infectieuses. Un individu peut être exposé par de l'air contaminé sans contact avec un collègue de travail, appelé ici « transmission indirecte air - homme », ou par transmission directe suite à des interactions rapprochées avec un individu infectieux, que nous avons défini ici comme « transmission directe homme - homme ». Une zone (représentant un volume d'air) peut être contaminée par la présence d'un individu infectieux en son sein, « transmission homme - air », ou l'échange d'air avec une zone de proximité dont l'air est vicié, « transmission air - air ». Ces principes de transmission sont illustrés par la Figure 3.

3.2 Logiciels

Une fois le concept de l'outil de simulation défini et les types de modélisation sélectionnés, il convient de réfléchir au choix des logiciels permettant la programmation et l'implémentation des modèles ABM et de CFD.

Le choix des logiciels pour les besoins de la modélisation sont résumés dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Choix des logiciels de modélisation

	Modélisation CFD	**Modélisation ABM**
Principe	Dynamique des flux d'air induit par la ventilation et par l'activité respiratoire et oratoire des individus	Dynamique des déplacements et comportements humains
Rôle	Définir les lois de transmission : - Entre les zones de travail (au sein d'un local) - Entre les locaux du navire	Simuler la transmission au sein de l'équipage
Logiciel choisi	Ansys Fluent : - Logiciel propriétaire - Achat de licence - Facilité d'utilisation - Sécurisé - Post et pré-traitement des données - Grande communauté active	Anylogic : - Langage de modélisation graphique - Extension de code Java - Facilité d'utilisation - Grande communauté active - Communication avec des bases de données externes

3.2.1 Choix du logiciel de CFD

De nombreux logiciels sont utilisés pour les simulations CFD de la dispersion des particules infectieuses dans l'air tels que Ansys Fluent ou OpenFOAM [Mohamadi & Fazeli, 2022]. Les caractéristiques de ces logiciels et les possibilités de modélisation qu'ils offrent sont similaires : modélisation d'écoulements fluides, de turbulences, de transferts de chaleur et de réactions chimiques. Le choix du logiciel de modélisation CFD s'est porté sur le logiciel propriétaire Ansys Fluent, la solution généraliste CFD d'Ansys, plutôt que OpenFOAM (logiciel open source gratuit) pour des raisons pratiques de licence et de sécurité. En effet, le niveau de sécurité des logiciels employés est un argument majeur puisqu'il assure l'intégrité des données sensibles utilisées pour la modélisation des navires militaires et de leur mission opérationnelle, ce que ne permet pas un logiciel open source tel que OpenFOAM.

3.2.2 Choix du logiciel ABM

De nombreux logiciels de modélisation à base d'agents, tels que NetLogo [John Kponyo et al., 2019], MassMotion [Mediaworks, s.d.] et Anylogic [Dellas et al., 2022] entre-autres, permettent la simulation de la propagation des maladies entre les individus. En raison du besoin de modéliser les membres de l'équipage et les zones géospatiales comme des entités et la richesse des interactions entre les différents types d'entités, le choix du logiciel de modélisation ABM s'est porté sur Anylogic [Attajer et al., 2021]. Anylogic possède un langage de modélisation graphique et facilite également l'extension du modèle de simulation avec le code Java. Il est possible de créer une interface utilisateur afin de collecter des données dans le modèle sans que l'utilisateur n'ait à coder. Cela est particulièrement pertinent pour adapter le modèle à différentes caractéristiques d'équipage, d'architecture de navire et de maladies ainsi qu'à un utilisateur qui serait non expert de la modélisation comme un infectiologue ou un biologiste médical par exemple. Anylogic communique avec des bases de données externes pouvant faciliter l'initialisation des multiples scénarios réalisés. Ce logiciel permet de créer des modèles dits « boites blanches » c'est-à-dire qu'il est possible de prévoir son fonctionnement interne ayant la connaissance des caractéristiques de fonctionnement de l'ensemble des éléments le composant. Cela est indispensable dans le processus de validation des modèles et de l'outil de simulation par des experts provenant des divers domaines auxquels appartient la problématique, à savoir les domaines de modélisation et simulation de systèmes industriels, les domaines militaires et de la conception navale et les domaines de la biologie, la médecine et l'épidémiologie.

4 Conclusion et Perspectives

L'émergence et la réémergence des maladies infectieuses peuvent avoir un véritable impact sur nos sociétés. Les navires, notamment militaires, sont des environnements complexes dont les caractéristiques et contraintes favorisent certaines voies de transmission des maladies infectieuses telle que la transmission par voie aérienne comme illustrée lors de la pandémie de Covid-19. La modélisation mathématique est utilisée dans la prévention des épidémies en partie pour évaluer l'efficacité de solutions préventives et protectrices. Les méthodes actuelles de modélisation utilisées en épidémiologie mathématique ne permettent pas de rendre compte de la complexité des phénomènes en jeu dans la transmission des maladies infectieuses lorsqu'appliquées à l'échelle des bâtiments et en particulier aux navires. Le concept de couplage de différentes méthodes de modélisation que sont la modélisation ABM et CFD permettrait l'évaluation de l'architecture d'un navire face aux risques biologiques et l'évaluation de la contribution des solutions implémentées à la maîtrise d'une épidémie à bord en modélisant une partie de la complexité des phénomènes participant à la transmission des maladies transmises principalement par voie aérienne que sont les comportements individuels et la dynamique des flux d'air.

L'outil étant conceptualisé et les logiciels de modélisation sélectionnés, la prochaine étape consiste en la programmation et l'implémentation des modèles sur les logiciels. Il conviendra ensuite de valider l'outil et les résultats de simulation obtenus par comparaison avec les données réelles de situations épidémiques documentées avant de passer à l'application des cas d'étude pour l'évaluation de la transmission des agents pathogènes à bord des navires militaires.

5 Remerciements

Remerciement à l'AID pour le financement partiel des travaux de la thèse « *Méthodes et outils de maîtrise des risques biologiques des navires militaires* » dans lesquels s'inscrit cet article.

6 References

Attajer, A., Darmoul, S., Chaabane, S., Riane, F., & Sallez, Y. (2021). Benchmarking simulation software capabilities against distributed control requirements: flexsim vs anylogic. Dans T. Borangiu, D. Trentesaux, P. Leitão, O. Cardin, & S. Lamouri (Éd.). (pp. 520-531). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-030-69373-2_38

Bland, J., Viedma, C., Davies, P., & Thapalyal, L. (1980, may). Smallpox is dead! [full issue]. (W. H. Organization, Éd.) *World health*, 3-39. Récupéré sur https://iris.who.int/handle/10665/355756

Bourlet, P. (2023, mai). Gestion de la crise covid à bord d'un navire de marine marchande : Atalante. *Journal Européen des Urgences et de Réanimation*, 35(1), 13-20. doi:10.1016/j.jeurea.2023.04.002

Buonanno, G., Morawska, L., & Stabile, L. (2020, december). Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: Prospective and retrospective applications. *Environment International*, 145, 106112. doi:10.1016/j.envint.2020.106112

Collège des universitaires de Maladies Infectieuses et Tropicales. (2023). ITEM N°178, Risques émergents, bioterrorisme, maladies hautement transmissibles. Dans *PILLY Étudiant 2023*.

Dellas, S., Ismail, A., Ehm, H., & Hartwick, A. (2022). A tutorial on how to set up a system dynamics simulation on the example of covid-19 pandemic. *2022 Winter Simulation Conference (WSC)*, (pp. 253-267). doi:10.1109/WSC57314.2022.10015369

Derjany, P., Namilae, S., Liu, D., Srinivasan, A., & McCreesh, N. (2020, july 09). Multiscale model for the optimal design of pedestrian queues to mitigate infectious disease spread. *PLOS ONE*, *15*(7), e0235891. doi:10.1371/journal.pone.0235891

Dong, T., Dong, W., & Xu, Q. (2022, august 18). Agent simulation model of covid-19 epidemic agent-based on gis: a case study of huangpu district, shanghai. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(16), 10242. doi:10.3390/ijerph191610242

Fauci, A. S. (1999, september 30). The aids epidemic — considerations for the 21st century. *New England Journal*

of Medicine, 341(14), 1046-1050. doi:10.1056/NEJM199909303411406

Gostin, L. O., Lucey, D., & Phelan, A. (2014, september 17). The ebola epidemic: a global health emergency. *JAMA, 312*(11), 1095. doi:10.1001/jama.2014.11176

Inghels, C., Da Cunha, C., Billon-Denis, E., Duclos, A., & Beghin, C. (2024, mars). Methods and tools for biological risk assessment of naval vessels. *International conference CBRNE Research & Innovation*. Strasbourg. Récupéré sur https://hal.science/hal-04529392v1

Institut Pasteur. (2024, avril 10). Une lutte historique contre les maladies infectieuses émergentes. Récupéré sur Institut Pasteur : https://www.pasteur.fr/fr/journal-recherche/dossiers/lutte-historique-contre-maladies-infectieuses-emergentes

John Kponyo, J., Coker, K., Owusu Agyemang, J., & Der, J. (2019). An algorithm to determine the extent of an epidemic spread: a netlogo modeling approach. *Engineering and Applied Sciences, 4*(4), 74. doi:10.11648/j.eas.20190404.11

Kassa, S., Njagarah, J., & Terefe, Y. (2020, september). Analysis of the mitigation strategies for COVID-19: From mathematical modelling perspective. *Chaos, Solitons & Fractals*, 138, 109968. doi:10.1016/j.chaos.2020.109968

Kermack, W. O., & McKendrick, A. G. (1927, august). A contribution to the mathematical theory of epidemics. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 115*(772), 700-721. doi:10.1098/rspa.1927.0118

Krivorotko, O., Sosnovskaia, M., Vashchenko, I., Kerr, C., & Lesnic, D. (2022, april). Agent-based modeling of COVID-19 outbreaks for New York state and UK: Parameter identification algorithm. Infectious Disease Modelling, 7(1), 30-44. doi:10.1016/j.idm.2021.11.004

Lee, B., Brown, S., Cooley, P., Potter, M., Wheaton, W., Voorhees, R., & Burke, D. (2010, may). Simulating school closure strategies to mitigate an influenza epidemic. *Journal of Public Health Management and Practice*, 16(3), 252-261. doi:10.1097/PHH.0b013e3181ce594e

Lee, B., Lau, D., Mogk, J., Lee, M., Bibliowicz, J., Goldstein, R., & Tessier, A. (2023, october). Generative design for COVID-19 and future pathogens using stochastic multi-agent simulation. *Sustainable Cities and Society*, 97, 104661. doi:10.1016/j.scs.2023.104661

Löhner, R., Antil, H., Gimenez, J., Idelsohn, S., & Oñate, E. (2022, november). A deterministic pathogen transmission model based on high-fidelity physics. Computer Methods in Applied *Mechanics and Engineering*, 401, 114929. doi:10.1016/j.cma.2022.114929

Mediaworks. (n.d.). *Oasys massmotion and the built environment*. Retrieved from Oasys: https://www.oasys-software.com/massmotion-aec/

Meynard, J.-B., de Laval, F., Texier, G., Gorgé, O., Degui, H., & Pommier de Santi, V. (2022). Gestion de l'épidémie de COVID-19 au sein du groupe aéronaval (janvier–avril 2020) par le Centre d'épidémiologie et de santé publique des armées. *Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine, 206*(8), 997-1010. doi:https://doi.org/10.1016/j.banm.2022.07.008

Mohamadi, F., & Fazeli, A. (2022, october). A review on applications of cfd modeling in covid-19 pandemic. *Archives of Computational Methods in Engineering, 29*(6), 3567-3586. doi:10.1007/s11831-021-09706-3

Msmali, A., Dayan, F., Rafiq, M., Ahmed, N., Ahmadini, A., & Hamali, H. (2023). A nonstandard computational investigation of seir model with fuzzy transmission, recovery and death rates. *Computers, Materials & Continua*, 77(2), 2251-2269. doi:10.32604/cmc.2023.040266

Mubayi, A., Pandey, A., Brasic, C., Mubayi, A., Ghosh, P., & Ghosh, A. (2021, july 31). Analytical estimation of data-motivated time-dependent disease transmission rate: an application to ebola and selected public health problems. *Tropical Medicine and Infectious Disease*, 6(3), 141. doi:10.3390/tropicalmed6030141

Ndembi, N., Folayan, M. O., Komakech, A., Mercy, K., Tessema, S., Mbala-Kingebeni, P., . . . Abdool Karim, S. S. (2025, january 29). Evolving epidemiology of mpox in africa in 2024. *New England Journal of Medicine*. doi:10.1056/NEJMoa2411368

Romero, V., Stone, W., & Ford, J. (2020, september). COVID-19 indoor exposure levels: An analysis of foot traffic scenarios within an academic building. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 7, 100185. doi:10.1016/j.trip.2020.100185

Schlienger, J.-L. (2022, 03 01). Petite histoire de l'épidémiologie de l'Antiquité à nos jours. *Médecine des Maladies Métaboliques, 16*(2), 191-199. doi:10.1016/j.mmm.2021.11.006

Sweileh, W. (2022, december). Global research activity on mathematical modeling of transmission and control of 23 selected infectious disease outbreak. Globalization and Health, 18(1), 4. doi:10.1186/s12992-022-00803-x

Velavan, T. P., & Meyer, C. G. (2020, march). The COVID-19 epidemic. *Tropical Medicine & International Health, 25*(3), 278-280. doi:10.1111/tmi.13383

Wang, Z., Galea, E., Grandison, A., Ewer, J., & Jia, F. (2022, march). A coupled Computational Fluid Dynamics and Wells-Riley model to predict COVID-19 infection probability for passengers on long-distance trains. *Safety Science*, 147, 105572. doi:10.1016/j.ssci.2021.105572

Wells, W. (1955). *Airborne Contagion and Air Hygiene*. Cambridge MA: Cambridge University Press.

World Health Organization. (2024). *Global technical consultation report on proposed terminology for pathogens that transmit through the air.* World Health Organization.

CIGI QUALITA MOSIM 2025

Une métaheuristique pour le problème d'ordonnancement du bloc opératoire sous contraintes de ressources

Marc Chouraqui*,1,2, Salma Makboul[1], Alice Yalaoui[1],
Farouk Yalaoui[1], Lionel Amodeo[1], Philippe Blua[2]
[1]LIST3N, Université de Technologie de Troyes, France
[2]Hôpital Européen, Marseille, France
m.chouraqui@hopital-europeen.fr

Résumé –Ce travail aborde le problème complexe de l'ordonnancement des opérations chirurgicales dans un bloc opératoire, impliquant la gestion des ressources humaines (chirurgiens), des infrastructures (salles opératoires) et des contraintes temporelles. Nous proposons une approche basée sur une métaheuristique de type Iterated Local Search (ILS), combinant une construction gloutonne initiale, une amélioration par recherche locale, et des perturbations contrôlées.Cette méthode a été testée sur des données réelles provenant d'un hôpital partenaire. L'approche permet de trouver, dans un temps raisonnable, des solutions avec un écart d'optimalité de l'ordre de 20 % par rapport à une borne inférieure. Ces résultats prometteurs ouvrent la voie à une application concrète au sein du bloc opératoire de l'hôpital partenaire.
Abstract – This paper addresses the optimization of surgical schedules in operating rooms, a complex problem involving surgeons, rooms, and temporal constraints. We propose an Iterated Local Search (ILS) based metaheuristic, which combines an initial greedy construction, local search improvement, and controlled perturbations.The approach can find solutions within a reasonable time, with an optimality gap of around 20% compared to a lower bound. These promising results pave the way for practical implementation within the operating room of the partner hospital.

Mots clés – Métaheuristique, Ordonnancement, bloc opératoire, RO santé.
Keywords – Metaheuristic, Surgery scheduling, Operating Rooms, OR in Health Services

---

1 Introduction et État de l'art

Les blocs opératoires, qui regroupent les salles d'opération et leurs unités de soins post-opératoires, représentent une composante essentielle des établissements hospitaliers. Ils constituent à la fois une source majeure de revenus, générant 40% à 70% des recettes via les salles d'opération, mais aussi de dépenses avec 20% à 40% des coûts opérationnels [Shehadeh and Padman 2022]. Dans ce contexte, l'ordonnancement des opérations chirurgicales implique l'allocation des interventions aux salles d'opération et la détermination de leurs horaires, avec pour objectif d'optimiser les ressources tout en respectant les contraintes hospitalières.. Ce document se concentre sur le bloc opératoire de notre hôpital partenaire, où plusieurs contraintes doivent être prises en compte.

L'optimisation du bloc opératoire a fait l'objet de nombreuses études dans la littérature [Rachuba et al. 2023].La planification du bloc opératoire s'organise selon trois niveaux décisionnels [Hof et al. 2017] . Le niveau stratégique, orienté long terme, concerne le dimensionnement des infrastructures, notamment le nombre de salles d'opération et l'allocation des capacités [Ma and Demeulemeester 2013]. Au niveau tactique, l'élaboration du (Master Surgery Schedule) [Akbarzadeh and Maenhout 2024] permet d'attribuer les créneaux opératoires aux différentes spécialités chirurgicales. Le niveau opérationnel se décompose quant à lui en deux phases distinctes : l'advance scheduling, qui consiste à affecter une date aux interventions [Landa et al. 2016], et l'allocation scheduling, qui détermine l'ordre et l'heure de début des opérations dans chaque salle [Vancroonenburg et al. 2015]. Si les problématiques stratégiques et tactiques ont été largement abordées dans la littérature, la planification à court terme des chirurgies électives demeure un défi majeur, en particulier en ce qui concerne la gestion des ressources disponibles. Trois approches principales de planification des salles d'opération sont identifiées dans la littérature [Guerriero and Guido 2011] :

- **Block Scheduling :** qui consiste à associer une ou plusieurs salle à un chirurgien (ou aux chirurgiens d'une même spécialité) et dans lequel les chirurgiens ne peuvent opérer que dans les salles qui leurs sont assignés
- **Open Scheduling :** qui consiste à une politique ou chaque chirurgien peut operer dans n'importe quelle salle capable d'acceuillir l'opération
- **Modified Block Scheduling :** qui revient à un systeme original de Block Scheduling dans lequel des changements de type Open Scheduling sont autorisés.

Plusieurs approches ont été explorées pour résoudre le problème complexe de l'ordonnancement des interventions chirurgicales. Bien que des méthodes exactes soient parfois utilisées [Makboul et al. 2021], elles sont souvent limitées par le temps de calcul nécessaire pour trouver la meilleur solution à cause de la $\mathcal{NP}-$Difficulté du problème [Van Essen et al. 2012]. Les méthodes approchées, basées sur des heuristiques ou métaheuristiques, sont plus couramment employées pour leur capacité à traiter des problèmes complexes de manière efficace. Parmi ces méthodes, on peut citer :

Algorithmes génétiques : [Holland 1992] On les retrouve notamment dans les travaux de [Guido and Conforti 2016; Marques et al. 2014; Tran et al. 2022]. **Recherche taboue :** [Glover et al. 2008] Les méthodes taboues, qui évitent de revenir sur les solutions déjà explorés afin de sortir des minima locaux, sont abordées dans [Molina-Pariente et al. 2015].**Recuits simulés :**[Eglese 1990] Inspirées des processus de refroidissement en physique, ces techniques sont explorées dans [Hans et al. 2008] pour leur capacité à trouver des solutions proches de l'optimal dans des délais raisonnables. **Approches GRASP :**[Feo and Resende 1995] et autres recherches locales Ces méthodes itératives, combinant phases de construction et d'amélioration locale, sont décrites dans [Vancroonenburg et al. 2015].Ces méthodes offrent des solutions robustes pour répondre aux contraintes multiples et aux exigences opérationnelles des blocs opératoires.

Parmi ces métaheuristiques, on retrouve principalement deux types d'encodages : un encodage soit matriciel soit sous la forme d'un vecteur de tuple dans lequel les opérations sont déjà préaffectées aux salles, comme dans [Vancroonenburg et al. 2015; Roland et al. 2010], et un encodage de permutation dans lequel chaque opération est assignée de manière gloutonne à la salle la plus appropriée, comme dans [Akbarzadeh and Maenhout 2024; Belkhamsa et al. 2018]. Dans ce document, nous détaillons d'abord la problématique du bloc opératoire de notre hôpital partenaire dans la section 2. Ensuite, la section 3 présente la métaheuristique de type ILS développée pour cette problématique, et enfin, les résultats obtenus sont présentés dans la section 4.

2 Description du problème

Dans le bloc opératoire de l'hôpital partenaire, on retrouve les caractéristiques suivantes :

- **Assignations fixes des chirurgiens :** Chaque intervention chirurgicale est préalable-

ment assignée à un chirurgien spécifique, et aucun changement d'attribution n'est permis et les horaires des chirurgiens doivent être respectés. Cette contrainte est parfois abordée dans la littérature comme dans [Meskens et al. 2013].

— **Horizon de planification :** Les chirurgiens ayant choisi la date de leurs opérations, il n'est pas possible de modifier celle-ci. Notre problématique considère donc un horizon d'une seule journée.

— **Compatibilité des salles :** Toutes les salles ne sont pas équipées pour accueillir tous les types d'interventions chirurgicales. Par exemple, les opérations orthopédiques doivent être effectuées dans des salles disposant d'une aération spéciale. On retrouve ce type de contrainte dans [Roland et al. 2010].

— **Phases d'une intervention :** Chaque intervention chirurgicale est divisée en trois phases distinctes :

  — *Phase de préparation :* Le patient entre dans la salle et est anesthésié.
  — *Phase chirurgicale :* Le chirurgien réalise l'intervention.
  — *Phase de nettoyage :* Le patient se réveille, et la salle est désinfectée.

  Les chirurgiens ne sont requis que pendant la phase chirurgicale, ce qui leur permet d'effectuer des interventions consécutives dans plusieurs salles, à condition que les horaires soient synchronisés de manière appropriée (voir Figure 1).Le fait que les chirurgiens ne soient necessaire que pendant la phase chirurgicale de l'opération est pris en compte dans [Younespour et al. 2019; Vancroonenburg et al. 2015; Akbarzadeh and Maenhout 2024].

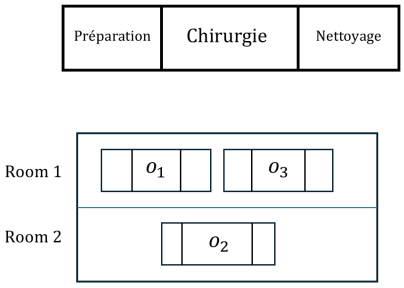
— **Préférences des chirurgiens :** En tant que médecins libéraux, les chirurgiens préfèrent minimiser le temps d'inactivité entre deux interventions consécutives. On retrouve cela dans [Denton et al. 2010] [Vancroonenburg et al. 2015]

— **Contraintes liées aux blocs :** Les salles d'opération sont regroupées en blocs de quatre salles. Pour diverses raisons techniques, il est préférable d'éviter qu'un chirurgien doive se déplacer entre blocs au cours de la journée (voir Figure 2). Toutefois, un chirurgien peut changer de salle entre deux opérations tant qu'elles se situent dans le même bloc, comme dans un système d'Open Scheduling. Au dela de notre connaissance, cette contrainte n'a jamais été étudié dans la littérature jusqu'a présent.

— **Contraintes liées aux spécialités :** Bien que les salles puissent accueillir des interventions de spécialités différentes, changer la spécialité d'une même salle engendre un temps de préparation dépendant des spécialités concernées, pour réorganiser la salle et le matériel. On retrouve cette caracteristique dans [Lahijanian et al. 2016; Abderrabi et al. 2021]

D'autres ressources sont prises en compte dans ce modèle, mais pas à un niveau individuel. Les infirmières, par exemple, sont prises en compte dans la mesure où leur disponibilité détermine le nombre de salles pouvant fonctionner un jour donné, bien qu'elles ne soient pas modélisées individuellement. De même, les anesthésistes sont intégrés à la planification à travers les contraintes de non-changement de blocs. En effet, leur planning consiste à suivre un chirurgien tout au long de ses interventions, et ils peuvent gérer jusqu'à deux anesthésies en même temps, à condition que les patients soient proches géographiquement les uns des autres. Les équipes de nettoyage, ainsi que le matériel médical, sont supposés ne pas être des facteurs limitants dans ce modèle La fonction objectif sera de minimiser le makespan tout en prenant en compte les contraintes *soft* de satisfaction telles que le respect des fenêtres de temps et des temps d'attente à l'aide d'une pénalité quadratique.

FIGURE 1 – Différentes étapes d'une opération chirurgicale et exemple d'ordonnancement des interventions d'un chirurgien sans temps d'inactivé



3 Méthode proposée

La métaheuristique Iterated Local Search (ILS) [Lourenco et al. 2010] (voir Algorithme 2) repose sur une approche itérative où une solution initiale est générée, puis améliorée à l'aide d'une fonction de recherche locale jusqu'à atteindre un optimum local. Une fois cet optimum atteint, une perturbation est appliquée à la solution afin d'en sortir, permettant ainsi d'explorer d'autres parties de l'espace des solutions. Le processus est ensuite répété,

FIGURE 2 – Structure Architecturale des blocs de salles opératoire de l'HE, cet hôpital possède 6 blocs de salles

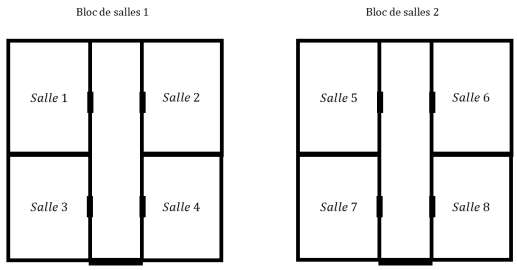
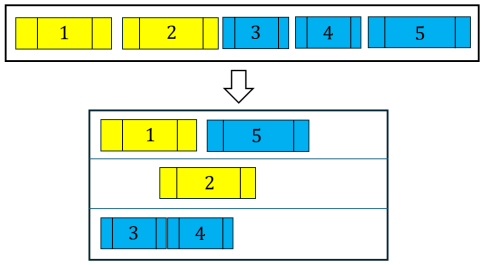


FIGURE 3 – Exemple de decodage d'un vecteur de permutation avec les opérations de deux chirurgiens (jaune et bleu) dans trois salles



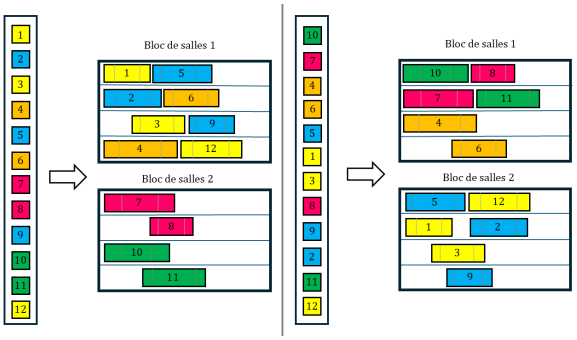
dans l'espoir de converger vers une solution globale de meilleure qualité. Nous proposons une résolution pour le problème en adaptant l'ILS pour ce faire, un encodage de permutation a été utilisé. Cet encodage est représenté par un vecteur qui contient l'ensemble des opérations chirurgicales, chacune apparaissant une seule fois. Ce vecteur est ensuite décodé en un planning opérationnel à l'aide d'un algorithme dédié. Cet algorithme traite chaque opération de manière séquentielle, en l'assignant à la salle qui peut l'accueillir le plus tôt possible, tout en respectant les contraintes liées à la disponibilité des chirurgiens et des salles (voir Algorithme 1. Le bloc de salles auquel les opérations d'un chirurgien sont affectées dépend principalement de la disponibilité de la première salle choisie pour la première intervention de ce chirurgien (voir Figure 4) .

Initialement, le planning est généré en suivant un ordre aléatoire des chirurgiens. Pour chaque chirurgien, les opérations sont également ordonnées de manière aléatoire. Différents opérateurs sont ensuite utilisés pour affiner la solution. Le premier opérateur, appelé **insertion**, consiste à déplacer une opération vers un autre emplacement dans la liste. Le second, nommé **permutation**, réalise un échange entre deux opérations dans la liste. Enfin, l'opérateur **déménagement** regroupe toutes les opérations d'un même chirurgien et les déplace dans un nouvel emplacement prédéfini, tout en conservant leur ordre initial.

Ces opérateurs sont appliqués de manière aléatoire et avec des paramètres aléatoires pour introduire un certain degré de variabilité dans l'algorithme. Lors de la phase de recherche locale, une stratégie de « première amélioration » (first improvement) est utilisée. Tout changement qui améliore la solution actuelle est accepté immédiatement. La solution est considérée comme un minimum local lorsqu'un nombre prédéfini d'itérations échoue à produire une amélioration.

Enfin, des perturbations sont appliquées en utilisant les opérateurs mentionnés, sans nécessaire-

FIGURE 4 – Exemple illustrant comment les premières opérations de la liste de permutation influencent l'attribution des blocs de salles aux chirurgiens



ment évaluer si elles améliorent ou détériorent la solution. Cette étape permet d'échapper aux minima locaux et d'explorer de nouvelles régions de l'espace des solutions.

4 Résultats expérimentaux

L'approche proposée a été testée sur plusieurs types d'instances, notamment des instances issues du bloc opératoire de l'hôpital partenaire. Les tests ont été réalisés sur un ordinateur équipé de Windows 10, 16 GB de RAM, et un processeur Intel i5-12400T (1.8 GHz). Chaque classe d'instances est composée d'environ quinze instances partageant des caractéristiques similaires.

Pour chaque instance, un gap d'optimalité a été calculé en utilisant deux bornes inférieures : les salles et les chirurgiens. La borne des salles correspond au makespan atteignable dans l'hypothèse d'une partition idéale des opérations entre les salles. Elle est obtenue en divisant la somme des durées des opérations par le nombre de salles [Franca et al. 1994]. La borne des chirurgiens correspond à la somme maximale des durées opératoires attribuées à un chirurgien. Le gap d'optimalité est alors cal-

Algorithm 1 Algorithme d'insertion d'une opération dans un planning

Input: P : un planning, o_{nouvelle} : opération à insérer
Output: P : planning mis à jour avec l'opération insérée

$c^* \leftarrow$ chirurgien assigné à o_{nouvelle}
$I_1 \leftarrow$ disponibilités de c^* dans P

foreach $[t_{début}, t_{fin}] \in I_1$ **do**
  $t_{\text{début}} \leftarrow t_{\text{début}}-$ temps de préparation de o_{nouvelle}
  $t_{\text{fin}} \leftarrow t_{\text{fin}}+$ temps de nettoyage de o_{nouvelle}
end

$s^* \leftarrow \emptyset$ $t_{\text{meilleur}} \leftarrow \infty$

$B_c \leftarrow$ bloc de salles assigné au chirurgien c (si applicable)
if $B_c = \emptyset$ **then**
  $S_{\text{candidat}} \leftarrow \{s \in S \mid o \text{ peut être réalisé dans } s\}$
else
  $B_c \neq \emptyset$
end
$S_{\text{candidat}} \leftarrow \{s \in B_c \mid o \text{ peut être réalisé dans } s\}$

foreach $s \in S_{candidat}$ **do**
  $I_2 \leftarrow$ disponibilités de s dans P
  foreach $o_k \in P$ **do**
    for $i \in \{0..|I_2|-1\}$ **do**
      if o_k *est dans* s ***et*** $I_2[i].t_{fin} =$ *fin de* o_k+ *durée totale de* $o_{nouvelle}$ **then**
        $I_2[i+1].t_{\text{début}} \leftarrow I_2[i+1].t_{\text{début}}-$ temps de transition entre o_k et o_{nouvelle}
      end
    end
  end
  $I_{\text{commun}} \leftarrow$ combiner les intervalles de I_1 et I_2
  foreach $[t_{début}, t_{fin}] \in I_{commun}$ **do**
    if *la durée totale de* $o_{nouvelle} \leq t_{fin} - t_{début}$ **then**
      if $t_{début} < t_{meilleur}$ **then**
        $s^* \leftarrow s$ $t_{\text{meilleur}} \leftarrow t_{\text{début}}$
      end
      break
    end
  end
end

if $s^* \neq \emptyset$ **then**
  $P \leftarrow P \cup \{(o_{\text{nouvelle}}, t_{\text{meilleur}}, s^*, c^*)\}$
  Mettre à jour B_c,I_1 et I_2
end
return P

Algorithm 2 Algorithme (ILS) appliqué à notre problématique

Input: T_{limite} : temps maximum, B : un modèle de bloc opératoire, $Opérateurs$: un ensemble d'opérateurs, k : un opérateur de perturbation
Output: $P_{\text{meilleure}}$: meilleure solution trouvée

$P_{\text{init}} \leftarrow$ construire une solution gloutonne sur B
$P \leftarrow P_{\text{init}}$ $P_{\text{meilleure}} \leftarrow P$
while *temps écoulé* $< T_{limite}$ **do**
  amélioration $\leftarrow$ **Faux**
  for *opérateur* $\in$ *{Opérateurs}* **do**
    $P' \leftarrow$ appliquer l'opérateur à P
    if $obj(P') < obj(P)$ **then**
      $P \leftarrow P'$ *amélioration* $\leftarrow$ **Vrai**
    end
    if $obj(P) < obj(P_{meilleure})$ **then**
      $P_{\text{meilleure}} \leftarrow P$
    end
  end
  if *amélioration* $=$ ***Faux*** **then**
    $P \leftarrow$ perturber $P_{\text{meilleure}}$ avec k
  end
end
return $P_{\text{meilleure}}$

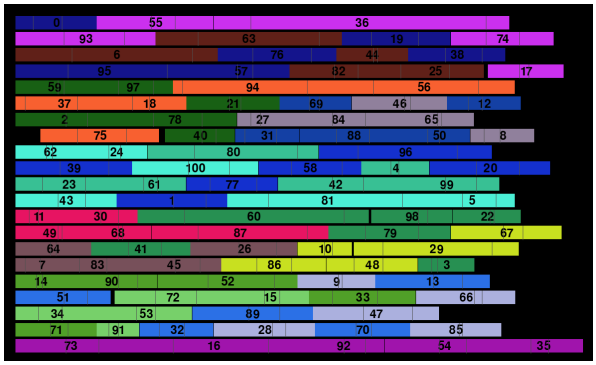
culé comme le ratio entre la solution obtenue et le maximum de ces deux bornes.

Ces bornes, bien que pertinentes, restent des approximations de problèmes $\mathcal{NP}$-difficiles (réductibles au problème de partition). D'autres sous-problèmes, tels que l'optimisation de la répartition des chirurgiens dans les blocs de salles ou la minimisation des temps morts, ne sont pas pris en compte dans ces bornes. Par la suite, on notera O.100 S.20 pour une instance avec 100 opérations à repartir dans 20 salles. On notera également O.100-120 pour un ensemble d'instances avec un nombre d'opérations allant de 100 à 120. De plus on notera ST si l'instance admet des temps de set up dépendants entre les opérations. Toutes les instances ont été testées avec des limites de temps de 60 et 300 secondes. Les résultats, présentés dans le Tableau 1, montrent des résultats jugés comme satisfaisant malgré leur gap d'optimalités élevés. ces résultats montrent que l'ILS se comporte comme un "anytime algorithm", c'est-à-dire un algorithme dont la qualité des résultats s'améliore avec le temps d'exécution. Cependant, l'encodage par permutation limite la réattribution efficace des blocs aux chirurgiens. Des pistes d'amélioration sont envisagées pour surmonter cette limitation.

La Figure 5 illustre un planning généré par l'ILS après 10 minutes de calcul sur une instance O.101 S.21, sans setups dépendants. Les chirurgiens, représentés par des couleurs distinctes, sont assignés à un seul bloc de salles. Chaque opération est di-

visée en trois phases (préparation, chirurgie et nettoyage), visualisées par des traits gris. Aucun chirurgien ne subit d'attente excessive entre deux opérations, et le taux d'optimalité atteint est de 12 % par rapport à la borne inférieure. Et la meilleure solution trouvée sur cette instance admet un gap d'optimalité de 7%. En relâchant la contrainte imposant qu'un chirurgien reste dans un seul bloc, une solution avec un gap réduit à 1,5 % a été trouvée. Cela montre que les contraintes influent significativement sur les performances de l'algorithme.

FIGURE 5 – Exemple de planning généré par l'ILS (101 opérations et 21 salles ou (O.101, S.21))



5 Conclusion et pistes futures

Cet algorithme a montré des résultats prometteurs, pouvant être utilisés pour générer un planning prévisionnel journalier du bloc opératoire de notre hôpital partenaire. Cependant, certaines contraintes actuellement en place à l'hôpital, comme certaines s'apparentant à du Block Scheduling, ont été relâchées dans ce travail car jugées non essentielles. Une vérification rigoureuse sera nécessaire pour s'assurer que ces simplifications n'engendrent aucune contradiction en termes de faisabilité opérationnelle.

Pour aller plus loin, il serait pertinent d'explorer une approche de type 'Diviser pour régner', qui pourrait s'avérer particulièrement efficace dans ce contexte. Cette stratégie consisterait à diviser le problème global en sous-problèmes indépendants, chaque bloc opératoire étant traité comme un système autonome. Cette approche permettrait non seulement de mieux gérer la contrainte interdisant aux chirurgiens de changer de bloc de salle, mais aussi de simplifier la résolution et potentiellement d'améliorer les performances de l'algorithme. Enfin, il serait pertinent d'ajouter la gestion des incertitudes dans l'algorithme, par exemple en prenant en compte des variations possibles dans les durées des interventions, la disponibilité des chirurgiens ou encore des imprévus opérationnels. L'intégration de ces incertitudes pourrait améliorer la robustesse du planning et permettre à l'algorithme face aux aléas en proposant des solutions plus flexibles.

Références

F. Abderrabi, M. Godichaud, A. Yalaoui, F. Yalaoui, L. Amodeo, A. Qerimi, and E. Thivet. Flexible job shop scheduling problem with sequence-dependent setup time and job-splitting : Hospital catering case study. *Appl. Sci.*, 11(4) :1504, 2021.

B. Akbarzadeh and B. Maenhout. A two-layer heuristic for patient sequencing in the operating room theatre considering multiple resource phases. *Comput. Oper. Res.*, 170 :106768, 2024.

M. Belkhamsa, B. Jarboui, and M. Masmoudi. Two metaheuristics for solving no-wait operating room surgery scheduling problem under various resource constraints. *Comput. Ind. Eng.*, 126 :494–506, 2018.

B. Denton, A. Miller, H. Balasubramanian, and T. Huschka. Optimal allocation of surgery blocks to operating rooms under uncertainty. *Oper. Res.*, 58, 2010.

R. W. Eglese. Simulated annealing : A tool for operational research. *Eur. J. Oper. Res.*, 46(3) :271–281, 1990.

T. A. Feo and M. G. C. Resende. Greedy randomized adaptive search procedures. *J. Glob. Optim.*, 6(2) :109–133, 1995.

P. M. Franca, M. Gendreau, G. Laporte, and F. M. Müller. A composite heuristic for the identical parallel machine scheduling problem with minimum makespan objective. *Comput. Oper. Res.*, 21(2) :205–210, 1994.

Fred Glover. Tabu Search—Part I. *ORSA Journal on Computing*, 1(3) :190-206, 1989.

F. Guerriero and R. Guido. Operational research in the management of the operating theatre : A survey. *Health Care Manage. Sci.*, 14 :89–114, 2011.

R. Guido and D. Conforti. A hybrid genetic approach for solving an integrated multi-objective operating room planning and scheduling problem. *Comput. Oper. Res.*, 87 : 270-282, 2016.

E. Hans, G. Wullink, M. van Houdenhoven, and G. Kazemier. Robust surgery loading. *Eur. J. Oper. Res.*, 185(3) :1038–1050, 2008.

S. Hof, A. Fügener, J. Schoenfelder, and J. O. Brunner. Case mix planning in hospitals : A review and future agenda. *Health Care Manage. Sci.*, 20 :207–220, 2017.

TABLE 1 – Performances de l'ILS sur des ensembles d'instances avec différents temps limites

Ensemble d'instances	**Temps (s)**	**Gap moyen (%)**
O.50-100,S.12	60	16.55
	300	15.03
O.50-100,S.12, ST	60	21.61
	300	18.72
O.100-120,S.18	60	15.44
	300	11.89
O.100-120,S.18, ST	60	23.34
	300	21.06

J. H. Holland. Genetic algorithms. *Sci. Am.*, 267(1) :66–73, 1992.

B. Lahijanian, M. Zarandi, and F. Farahani. Proposing a model for operating room scheduling based on fuzzy surgical duration. Conference of the North American Fuzzy Information Processing 1–5, 2016.

P. Landa, R. Aringhieri, P. Soriano, E. Tànfani, and A. Testi. A hybrid optimization algorithm for surgeries scheduling. *Oper. Res. Health Care*, 8 :103–114, 2016.

H. Lourenco, O. Martin, and T. Stützle. Iterated Local Search : Framework and Applications. Volume 146, pages 363–397, 2010.

G. Ma and E. Demeulemeester. A multilevel integrative approach to hospital case mix and capacity planning. *Comput. Oper. Res.*, 40(9) :2198–2207, 2013.

S. Makboul, S. Kharraja, A. Abbassi, and A. Alaoui. A two-stage robust optimization approach for the master surgical schedule problem under uncertainty considering downstream resources. *Health Care Manage. Sci.*, 25, 63–68 2022.

I. Marques, M. E. Captivo, and M. Vaz Pato. Scheduling elective surgeries in a Portuguese hospital using a genetic heuristic. *Oper. Res. Health Care*, 3(2) :59–72, 2014.

N. Meskens, D. Duvivier, and A. Hanset. Multi-objective operating room scheduling considering desiderata of the surgical team. *Decis. Support Syst.*, 55(2) :650–659, 2013.

J. M. Molina-Pariente, E. W. Hans, J. M. Framinan, and T. Gomez-Cia. New heuristics for planning operating rooms. *Comput. Ind. Eng.*, 90 :429–443, 2015.

Rachuba, S., Reuter-Oppermann, M. Thielen, C. Integrated planning in hospitals : a review. *OR Spectrum 2024.*

B. Roland, C. Di Martinelly, F. Riane, and Y. Pochet. Scheduling an operating theatre under human resource constraints. *Comput. Ind. Eng.*, 58 :212–220, 2010.

K. S. Shehadeh and R. Padman. Stochastic optimization approaches for elective surgery scheduling with downstream capacity constraints : Models, challenges, and opportunities. *Comput. Oper. Res.*, 137 :105523, 2022.

Q. N. H. Tran, N. Q. Nguyen, H. Chehade, L. Amodeo, and F. Yalaoui. Outpatient Appointment Optimization : A Case Study of a Chemotherapy Service. *Appl. Sci.*, 12(2) :659, 2022.

T. Van Essen, J. Hurink, W. Hartholt, and B. Akker. Decision support system for the operating room rescheduling problem. *Health Care Manage. Sci.*, 15 :355–372, 2012.

Vancroonenburg, W., Smet, P., and Vanden Berghe, G.. A two-phase heuristic approach to multi-day surgical case scheduling considering generalized resource constraints.*Oper. Res. Health Care*, 7 :27—39, 2015.

M. Younespour, A. Atighehchian, K. Kianfar, and E. T. Esfahani. Using mixed integer programming and constraint programming for operating rooms scheduling with modified block strategy. *Oper. Res. Health Care*, 23 :100220, 2019.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Satisfaction des Professionnels de Santé et Optimisation des Processus : Une Approche Intégrée

IMEN MEJRI[1,2], SAFA BHAR LAYEB[1,3] , NAJLA AISSAOUI[1,4] , MOHAMED YASSINE KAABAR[5]

[1] LR-OASIS, École Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Université de Tunis El Manar, Tunis, Tunisie
[2] École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Tunis, Université de Tunis, Tunisie
[3] Centre Génie Industriel, IMT Mines Albi, Université de Toulouse, Albi, France
[4] École Nationale d'Ingénieurs de Carthage, Université de Carthage, Tunis, Tunisie
[5] Laboratoire d'analyses médicales de l'hôpital Tahar Maamouri, Nabeul, Tunisie

imen.mejri@enit.utm.tn

***Résumé* – Etant leurs principaux clients, la satisfaction des médecins prescripteurs constitue un indicateur clé pour évaluer la qualité des services fournis par les laboratoires d'analyses médicales rattachés aux hôpitaux. Dans cette étude, nous nous intéressons à l'évaluation de la performance du laboratoire d'analyse d'un hôpital universitaire tunisien à travers l'évaluation de la satisfaction de ses médecins prescripteurs et l'analyse du processus de prise en charge. Après la collecte des données, une analyse approfondie a été menée en utilisant divers outils statistiques, notamment l'Analyse en Composantes Principales (ACP) afin d'extraire les informations les plus pertinentes des données issues d'une enquête de satisfaction. Sur la base des résultats obtenus et des points faibles identifiés, une cartographie des flux a été réalisée à l'aide de la cartographie de la chaine de valeur (Value Stream Mapping, VSM) pour analyser les processus du laboratoire et proposer des améliorations. Cette approche intégrée permet non seulement d'optimiser le fonctionnement du laboratoire, mais aussi d'améliorer l'expérience des médecins prescripteurs, en réduisant les inefficacités et en augmentant la qualité du service rendu.**

***Mots clés* – Enquête de Satisfaction, Cartographie de la Chaine de Valeur, Optimisation des Processus, Laboratoire d'Analyses Médicales, Amélioration Continue.**

1 INTRODUCTION

Les établissements de soins du secteur public sont des structures qui accueillent des centaines de milliers de patients chaque jour. Leur mission est d'assurer des soins rapides et efficaces afin de garantir la satisfaction et le bien être des patients (Layeb et al., 2021). Tel que le souligne Abass et al., (2021), les hôpitaux universitaires publics, en particulier, sont dotés d'une haute importance et jouent un rôle primordial en prenant en charge aussi bien les maladies courantes que les pathologies rares et graves. Or ces dernières nécessitent des procédures médicales et des traitements complexes qui font souvent appel à de multiples parties prenantes. Ceci se traduit par des processus complexes, difficiles à piloter, à évaluer et à améliorer (Ter Hussain, et al., 2019, Hasni et al., 2022), représentant un obstacle majeur qu'il est impératif de surmonter (Santos et al., 2019). Ce qui complique d'avantage cette situation, déjà critique, est que ces établissements ont dû faire face ces dernières années, à une demande croissante accompagnée d'une pression financière. Il en résulte des temps d'attente de plus en plus longs et fréquents, ainsi que des difficultés et des retards d'accès aux soins, créant une insatisfaction et un risque sanitaire pour la population. Face à une telle situation inacceptable, il est essentiel que les hôpitaux universitaires se concentrent sur l'identification de stratégies visant à améliorer la satisfaction des patients (Özer et al., 2017).

La médecine diagnostique, en tant que spécialité de santé complémentaire, bénéficie d'une attention particulière dans les environnements hospitaliers publics. Les laboratoires d'analyses médicales jouent un rôle essentiel au sein des organisations de santé, en réalisant une large gamme de tests qui aident les médecins à prendre des décisions médicales et à établir des diagnostics précis, afin de déterminer les traitements optimaux permettant aux patients de gérer efficacement leur santé et leur bien-être (Alshammari et al., 2024). Les pratiques dans ce secteur doivent être de haute qualité, car les laboratoires sont chargés de fournir des résultats fiables pour contribuer efficacement à la prévention et au contrôle des maladies.

Aissaoui et al. (2024) soulignent que le processus d'analyse en laboratoire constitue souvent un goulot d'étranglement important dans les hôpitaux universitaires publics, affectant considérablement le temps de traitement des patients et l'efficacité globale. Ces structures fonctionnent selon des processus complexes impliquant de nombreuses activités, ressources et échanges de flux entre divers acteurs. L'augmentation de la demande, alimentée par les patients provenant de différents services hospitaliers tels que les urgences, les consultations externes (Mbarek et al., 2024) et les unités chirurgicales, représente un défi majeur. L'objectif principal pour ces unités est de fournir des soins dans les meilleurs délais, de réduire les délais d'attente et d'assurer des sorties efficaces des patients, tout en améliorant la satisfaction tant des patients que des professionnels de santé (Layeb et al., 2018). Tel que souligné dans la littérature, ceci passe inévitablement par une chasse aux gaspillages et une accélération des flux (Santos et al., 2019).

Ainsi, nous proposons dans cette étude une analyse de l'ensemble du processus de prise en charge des patients, depuis leur arrivée au laboratoire de l'hôpital universitaire public jusqu'à leur sortie. Une enquête bien structurée, à la fois

qualitative et quantitative, a été développée pour mesurer de manière systématique le niveau de satisfaction des professionnels qui orientent leurs patients vers le laboratoire. Celle-ci constituera un élément clé pour identifier les priorités et un facteur stratégique dans l'évaluation des opportunités d'amélioration des processus. Une étude VSM a ensuite été appliquée pour analyser en détail les flux, permettant d'identifier les points de faiblesse et de proposer des améliorations pour optimiser le système de soin.

La suite de l'article est organisée comme suit : la section 2 est consacrée à l'enquête de satisfaction des médecins prescripteurs, détaillant les objectifs, la méthodologie et les résultats obtenus. La section 3 aborde la mesure des gaspillages de processus à l'aide de l'outil VSM, en mettant en lumière les inefficacités identifiées et les pistes d'amélioration proposées. Enfin, la section 4 conclut l'article en récapitulant les principaux résultats et leurs implications.

2 ENQUETE DE SATISFACTION DES MEDECINS PRESCRIPTEURS

2.1 Contexte de l'étude

L'étude a été menée à l'Hôpital Tahar Maamouri, un Centre Hospitalo-Universitaire tunisien comportant 13 départements, dont un service d'urgence, 18 services de consultations externes, un laboratoire de biologie médicale, un laboratoire d'anatomopathologie, un service de radiologie et une pharmacie. L'hôpital dispose également d'un bloc opératoire pour les interventions chirurgicales et réalise environ 133 000 examens ambulatoires chaque année. Le laboratoire médical est chargé de traiter plus de 50 000 échantillons par an provenant de patients des divers services de l'hôpital, entraînant un processus complexe en plusieurs étapes (Mejri et al., 2024). Il est à noter que plus de 70 % de ces patients sont ambulatoires, en provenance des services externes, des urgences et d'autres unités de l'hôpital. Par conséquent, notre étude se concentrera sur les patients ambulatoires. Les retards dans la gestion de ces patients peuvent perturber le fonctionnement de l'hôpital et exercer une pression supplémentaire sur le service des urgences déjà surchargé, une grande partie de ces patients venant des urgences et attendant d'être admis à l'hôpital.

2.2 Méthodologie de collecte de données

L'étude a débuté par des observations préliminaires de l'environnement du laboratoire hospitalier, validant ainsi les objectifs du projet et établissant une méthodologie rigoureuse de collecte de données pour identifier les causes du gaspillage et de l'inefficacité. Une "Gemba Walk" a été réalisée pour observer directement le flux des patients, afin de mieux comprendre le fonctionnement réel du système de santé. Issu du mot japonais « Gembutsu », « Gemba Walk » fait référence à « l'endroit réel » où les données ont été collectées. L'idée est de parcourir le processus avec les membres impliqués afin d'observer et de comprendre comment le travail est réellement effectué (Dalton, 2019). Cette approche a permis de recueillir des données essentielles sur le nombre quotidien d'arrivées, les caractéristiques des patients, leurs comportements et modes de prise en charge. Selon Abisourour et al. (2020), le point de départ de toute amélioration des flux consiste à définir le début et la fin du processus correspondant à analyser. Dans ce contexte, une modélisation des parcours de soins a été réalisée en utilisant l'outil BPMN (Business Process Model and Notation) afin de décrire de manière intégrée les processus d'analyse, logistiques et administratifs (Figure 1). Ce modèle a permis de visualiser et de cartographier les différentes étapes du parcours du patient, depuis son arrivée jusqu'à la remise des résultats, en prenant en compte l'ensemble des interactions entre les services du laboratoire, le personnel administratif et les médecins prescripteurs. Le système de gestion des files d'attente du laboratoire de notre cas d'étude fonctionne selon le principe du "Premier arrivé, premier servi" (FCFS), sans tenir compte de l'état du patient ni de la planification des rendez-vous. Le processus des patients ambulatoires commence par l'enregistrement administratif, suivi de l'enregistrement au laboratoire et de l'attente en salle pour la collecte des échantillons. Ces derniers sont ensuite analysés selon la politique de traitement par lots.

Dans le cadre de cette étude, un questionnaire structuré a été élaboré pour recueillir les avis des médecins prescripteurs, permettant de recueillir des informations détaillées sur leurs perceptions du processus de soins. Les entretiens individuels ont ainsi fourni une compréhension approfondie de leurs perspectives et des éventuels points d'amélioration du système.

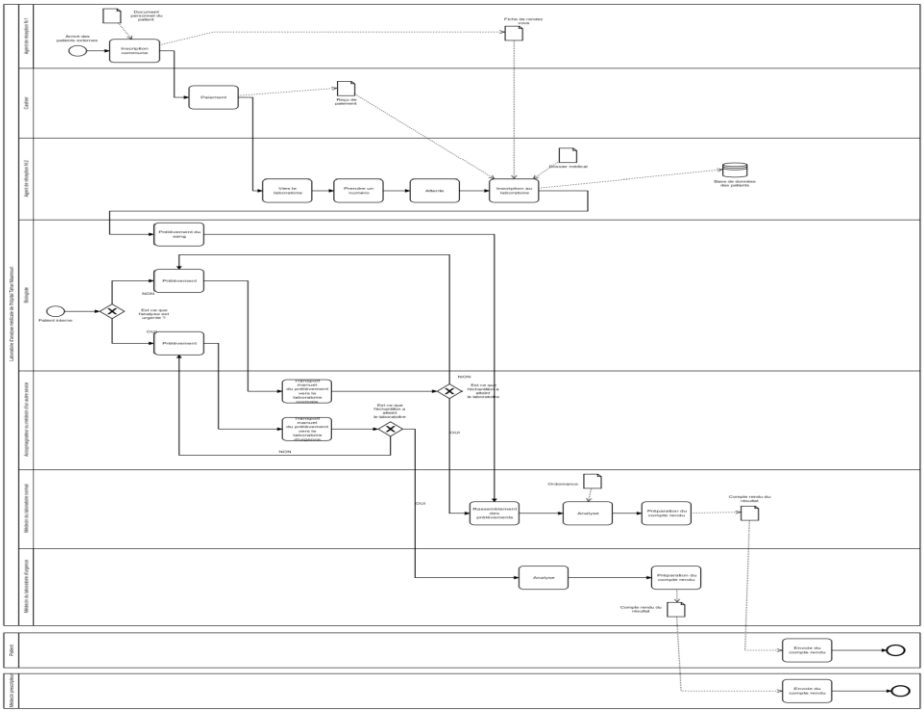


Figure 1. Le schéma BPMN du laboratoire

2.3 Mise en œuvre d'une enquête qualitative pour mesurer la satisfaction des médecins prescripteurs

Pour évaluer la satisfaction des médecins prescripteurs concernant le fonctionnement du laboratoire d'analyses médicales de l'hôpital universitaire, une enquête a été réalisée. L'enquête a ciblé les prescripteurs des huit services suivants : cardiologie, chirurgie générale, chirurgie orthopédique, gastro-entérologie, médecine interne, réanimation, urgences et pneumologie. Au total, 67 réponses ont été collectées, représentant 80,72% de la population cible des 83 médecins.

L'enquête se compose de sept sections principales :

- À propos des médecins prescripteurs et de leur pratique : Cinq questions préliminaires pour obtenir des informations personnelles sur les médecins (nom, prénom, sexe, tranche d'âge, service d'exercice et grade).
- Les échanges avec le laboratoire : Neuf questions, dont sept fermées et deux ouvertes, portant sur la qualité de la communication entre les médecins et l'équipe du laboratoire. Ces questions sont adaptées à la spécificité du laboratoire, visant à évaluer l'efficacité des échanges dans ce contexte particulier.
- Réalisation des résultats : Six questions fermées et une question ouverte évaluent la satisfaction des médecins concernant des facteurs influençant directement leur travail, comme l'horaire du laboratoire, la prise en compte des demandes urgentes, et la gestion des réclamations.
-Rendu des résultats : Quinze questions (dont douze fermées et trois ouvertes) concernant la satisfaction relative à la qualité des résultats reçus, le mode de transmission des résultats, et la cohérence de l'information selon les différents horaires de travail du laboratoire (jour, nuit, garde).
-Confidentialité médicale : Section standard qui évalue le respect des principes de confidentialité et la qualité professionnelle des médecins.
-Satisfaction globale : Une série de questions pour mesurer le niveau global de satisfaction des médecins vis-à-vis du laboratoire. Cette section permet d'identifier les facteurs clés influençant la satisfaction.

Les questions ont été formulées pour refléter les spécificités du laboratoire et du contexte hospitalier, en garantissant des données pertinentes pour analyser les performances du laboratoire et identifier les axes d'amélioration.

2.4 Analyse quantitative des enjeux clés

Les résultats de l'enquête qualitative menée auprès des médecins ont été condensés sous forme d'échelle quantitative, et l'analyse de leur satisfaction a permis de tirer des observations concluantes. Après avoir collecté les données, une analyse approfondie a été réalisée à l'aide de divers outils statistiques, notamment l'analyse en composantes principales (ACP), grâce à l'utilisation du logiciel R. Ces expérimentations numériques ont fourni des informations sur les points forts et les faiblesses du laboratoire, qui ont contribué à l'insatisfaction des médecins. Dans cette section, nous présentons les résultats issus de cette analyse statistique. Les figures 2-7 suivantes illustrent la répartition en pourcentage des réponses aux quelques questions sélectionnées, relatives aux différentes sections du questionnaire.

Figure 2. Résultats enquête sur la qualité de l'information

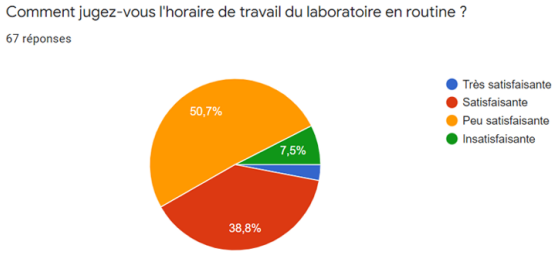


Figure 3. Résultats enquête sur l'horaire de travail

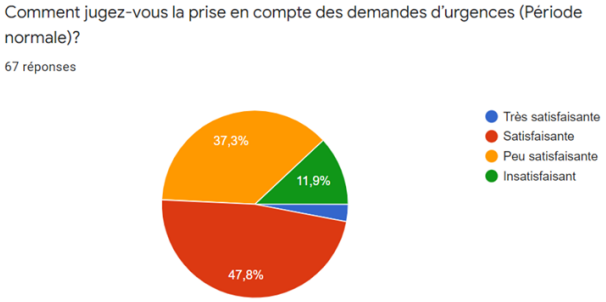


Figure 4. Résultats enquête de la prise en compte des demandes d'urgence en période normale

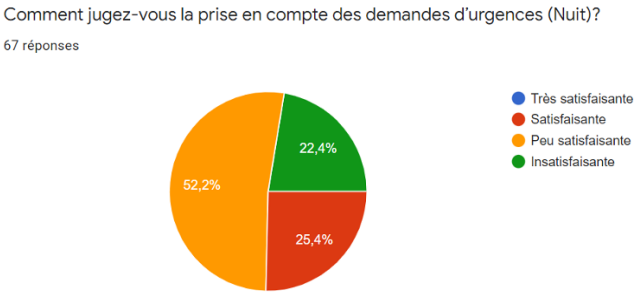


Figure 5. Résultats enquête sur la prise en compte des demandes d'urgence la nuit

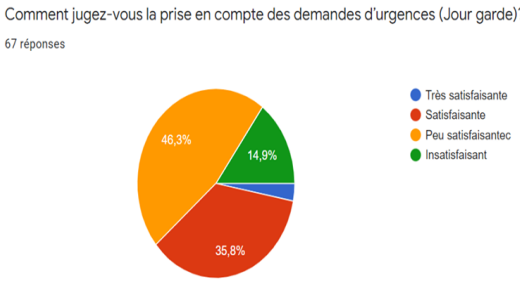


Figure 6. Résultats enquête sur la prise en compte des demandes d'urgence les jours de garde

Figure 7. Résultats enquête sur les possibilités de réclamation

À la suite d'une première analyse des résultats, plusieurs constats importants ont été relevés. Tout d'abord, 50,7% des médecins jugent l'horaire de travail du laboratoire peu satisfaisant, tandis que 7,5% le trouvent totalement insatisfaisant, et 38,8% satisfaisant, indiquant la nécessité d'adapter l'organisation horaire pour répondre aux besoins de ces groupes. Concernant la prise en charge des demandes urgentes, 37,3% des médecins sont peu satisfaits et 11,9% insatisfaits. En période de garde, 46,3% expriment une faible satisfaction et 14,9% sont insatisfaits. Pour la période de nuit, l'insatisfaction atteint 74,6%, ce qui peut être attribué à un manque d'effectifs. De plus, 55,2% des médecins trouvent difficile de soumettre une réclamation, et 7,5% jugent cette tâche impossible. Enfin, 43,3% sont peu satisfaits et 13,4% insatisfaits du traitement des réclamations, ce qui semble lié à des obstacles dans la procédure de soumission. Ces résultats suggèrent des lacunes significatives dans l'organisation, notamment pendant les périodes de garde et de nuit, et indiquent des pistes d'amélioration

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est un outil largement utilisé dans l'analyse de données contemporaine, appliqué dans diverses disciplines scientifiques. Son objectif principal est d'identifier les fondements les plus significatifs pour réexprimer un ensemble de données donné [Salem, 202]. Dans notre contexte, l'ACP a été utilisée pour identifier les questions abordant des aspects ou des composantes similaires et pour déterminer lesquels contribuaient le plus à la satisfaction globale des médecins. Cette analyse a permis de mieux comprendre les motifs et les relations sous-jacentes au sein des données de l'enquête (Figure 3).

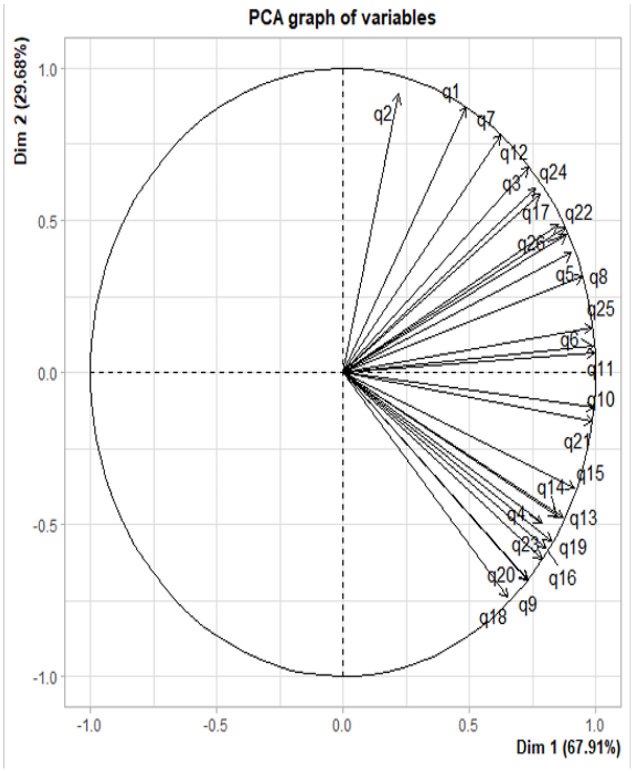


Figure 3. Résultat de l'Analyse en Composantes Principales

L'analyse en composantes principales (ACP) a révélé plusieurs corrélations importantes entre les questions du questionnaire.

Une forte corrélation a été observée entre les questions Q6, Q10, Q11 et Q21, concernant la prise en compte des demandes d'urgences et le délai de rendu des résultats, suggérant que ces éléments sont associés à une insatisfaction marquée parmi les médecins. De plus, une corrélation a été identifiée entre Q18 (communication sur place) et Q20 (qualité des informations délivrées), indiquant que l'insatisfaction en matière de communication est principalement due à la qualité de l'information transmise. Une relation similaire a été trouvée entre Q1 (communication par téléphone fixe) et Q2 (délai d'attente pour obtenir une information), mettant en évidence que l'insatisfaction liée à la communication téléphonique provient principalement des délais d'attente. Une corrélation inverse entre Q18 et Q1 suggère que la satisfaction liée à la communication sur place est en fait une conséquence de l'insatisfaction de la communication par téléphone. Enfin, une corrélation entre Q17 (possibilité de faire une réclamation) et Q8 (traitement des réclamations) montre que la satisfaction concernant le traitement des réclamations dépend de la facilité avec laquelle les médecins peuvent faire leurs réclamations.

En conclusion, l'analyse a révélé des corrélations clés entre plusieurs facteurs influençant la satisfaction des médecins prescripteurs, notamment la communication et le traitement des réclamations. Toutefois, les défaillances majeures détectées concernent principalement la prise en compte des demandes d'urgences, le délai de rendu des résultats et la cohérence des résultats. Ces points faibles sont des éléments cruciaux qui impactent l'insatisfaction générale des prescripteurs et soulignent la nécessité de résoudre ces problèmes pour améliorer la qualité du service.

3 MESURE DES GASPILLAGES DE PROCESSUS EN UTILISANT LA CARTOGRAPHIE DE LA CHAINE DE VALEUR

Pour analyser les gaspillages tout au long du processus en laboratoire, nous avons utilisé la cartographie des flux de valeur (Value Stream Map - VSM). Cet outil s'est révélé particulièrement efficace pour quantifier les temps d'attente, comprendre de manière globale les séquences du processus et identifier les goulots d'étranglement aussi bien en domaine industriel que dans les organisations de santé (Mbarek et al., 2021 ; Aissaoui et al., 2022).

En se référant au travail de Aissaoui et al., (2024), la VSM a été divisée en 3 composants distincts : (i) Flux des patients : ce composant représente le mouvement des patients à travers le parcours. (ii) Front Office : cette section concerne les activités de contact direct avec les patients, réalisées par le personnel en face-à-face. (iii) Back Office : il s'agit des activités effectuées par le personnel qui ne sont pas visibles par les patients ou qui ne nécessitent aucune interaction directe. En parallèle, une ligne de temps a été établie pour différencier les activités à valeur ajoutée et celles sans valeur ajoutée. Nous avons systématiquement mesuré la durée de toutes les opérations à travers une série d'évaluations de temps. Nous avons réalisé 30 chronométrages distincts pour chaque opération, ce qui nous a permis de déterminer le temps alloué aux tâches à valeur ajoutée par rapport aux tâches non ajoutant de valeur, ainsi que de calculer le temps de traitement total.

Nous avons collecté les données nécessaires sur le processus et les délais à travers des Gemba Walks et nous avons construit la cartographie des flux de valeur (VSM) représentant l'état actuel du parcours patient dans le laboratoire (Figure 4) .

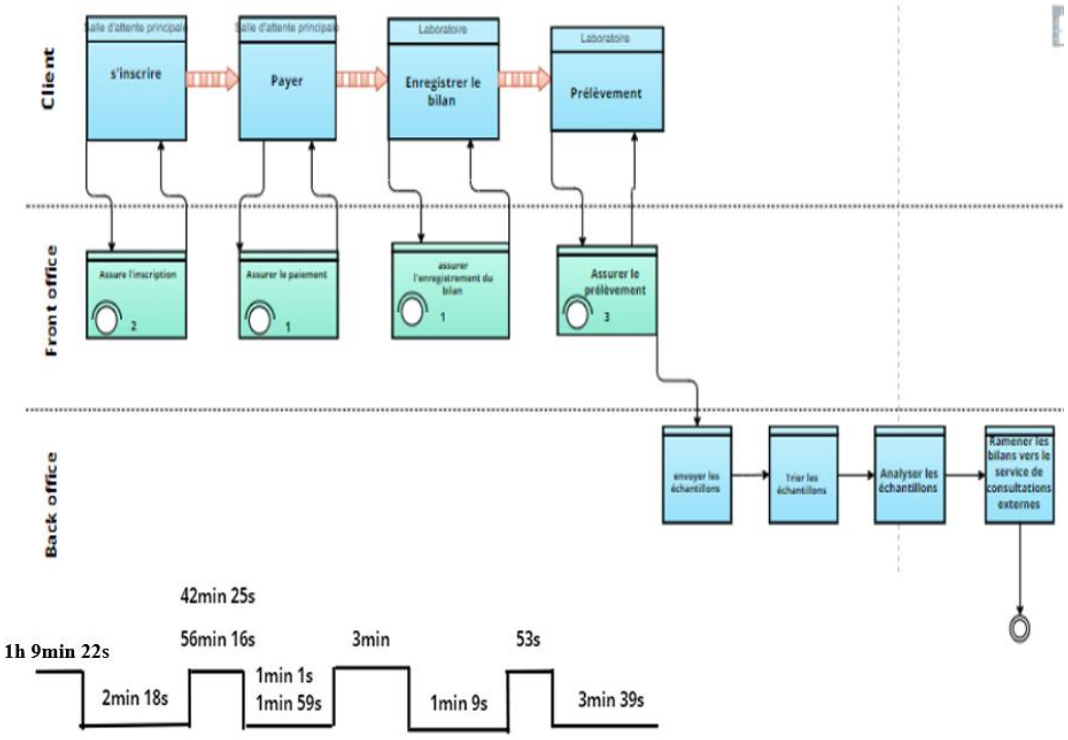


Figure 4. Cartographie de la chaîne de valeur du Laboratoire

Le processus débute lorsqu'un patient arrive vers 6 h, reçoit un numéro de ticket et se place dans une file d'attente commune pour l'enregistrement et le paiement. Ensuite, les patients passent par un enregistrement secondaire, priorisé selon le FIFO, suivi d'un prélèvement sanguin, puis les échantillons sont envoyés au laboratoire pour analyse. Le temps total de service a été de 2 heures, 11 minutes et 7 secondes, avec un faible pourcentage de valeur ajoutée de 6,5 %. Les principales sources de gaspillage identifiées sont les temps d'attente, les déplacements inutiles, la congestion des patients dans la salle d'attente et le temps perdu dû à la désorganisation. L'analyse de la carte de flux de valeur (VSM) a révélé des goulots d'étranglement importants, notamment lors des étapes d'enregistrement (1 h, 9 min, 22

s) et de paiement (49 min, 20 s), entraînant de longs délais de service. Les taux de valeur ajoutée étaient très faibles, à 3,07 % pour l'enregistrement et 3,4 % pour le paiement ce qui s'explique par l'arrivée anticipée des patients avant l'ouverture des guichets, créant ainsi de grandes files d'attente. Le faible temps d'inter-arrivée de 30 secondes pendant les heures de pointe aggrave encore les temps d'attente. De plus, la salle d'attente partagée entraîne de la confusion, les patients contournant les files d'attente, ce qui génère des conflits et des retards, contribuant ainsi à du temps non ajouté de valeur.

4 CONCLUSION

Les systèmes de santé publics fonctionnent avec des ressources limitées et nécessitent des processus optimisés pour atteindre les objectifs des patients tout en assurant une expérience positive. Grâce à l'utilisation d'enquêtes de satisfaction et de l'outil Lean de la cartographie des flux de valeur (VSM), le personnel du laboratoire a pu identifier les inefficacités et les points de congestion dans les processus du laboratoire. Cette étude a permis d'analyser le flux des patients, notamment en réduisant les temps d'attente et en optimisant l'allocation des ressources. Les résultats ont montré des faiblesses dans des étapes clés comme l'enregistrement et le paiement, contribuant à une surcharge de travail et à des conflits dans la zone d'attente. En plus de répondre aux défis immédiats liés à l'amélioration des processus, cette étude favorise une culture d'amélioration continue au sein de l'hôpital, essentielle pour renforcer l'efficacité globale et améliorer la satisfaction des patients et du personnel.

5 REMERCIEMENTS

Les auteurs expriment leur gratitude au personnel de l'Hôpital Tahar Maamouri pour son soutien tout au long de la recherche. Ils remercient chaleureusement les étudiants en ingénierie Hamdi MADHI, Nada GMATI, Mayssen Didi et Firas Missaoui pour leurs efforts.

6 REFERENCES

Abass, G., Asery, A., Al Badr, A., AlMaghlouth, A., AlOtaiby, S., & Heena, H. (2021). Patient satisfaction with the emergency department services at an academic teaching hospital. Journal of Family Medicine and Primary Care, 10(4), 1718-1725.

Alshammari, S. S. H., Alahmari, A. Y., Almasoud, F. A., Alanezi, K. A., ALHARBI, R. S. H., Alanazi, M. H., & Alenazi, W. M. (2024). The importance of cooperation between nursing and clinical medical laboratories in improving the quality of health care. Tec Empresarial, 6(2), 813-824.

Aissaoui, N. O., Ben Mbarek, H., Layeb, S. B., & B. Hadj-Alouane, A. (2024). A BPMN-VSM based process analysis to improve the efficiency of multidisciplinary outpatient clinics. Production Planning & Control, 35(5), 461-491.

Aissaoui, N. O., Layeb, S. B., Zeghal, F., Hamouda, C., Moujahed, H., Zaidi, A. Z., & Jmal, Y. J. (2022). Amélioration de la performance d'un service d'urgences: apport du business process management et du lean management. Revue Française De Gestion Industrielle, 36(2), 49-69.

Abisourour, J., Hachkar, M., Mounir, B., & Farchi, A. (2020). Methodology for integrated management system improvement: combining costs deployment and value stream mapping. International Journal of Production Research, 58(12), 3667-3685.

Ben Mbarek, H., Aissaoui, N. O., Jaoua, A., Layeb, S. B., & Hadj-Alouane, A. B. (2024). A human behaviour-based simulation model for resource allocation at a multi-specialty outpatient clinic. Journal of Simulation, 18(3), 283-310.

Dalton, J., & Dalton, J. (2019). Gemba walks. Great Big Agile: An OS for Agile Leaders, 173-174.

Hasni, M., Layeb, S. B., Aissaoui, N. O., & Mannai, A. (2022). Hybrid model for a cross‐department efficiency evaluation in healthcare systems. Managerial and Decision Economics, 43(5), 1311-1329.

Layeb, S. B., Aissaoui, N. O., Hamouda, C., Zeghal, F., Moujahed, H., & Zaidi, A. (2021). Indicateurs de Performance et Tableau de Bord pour un Service d'Urgences d'un Centre Hospitalier Universitaire. La Tunisie Medicale, 99(4), 435.

Layeb, S. B., Hamouda, C., Zeghal, M. F., Aissaoui, O. N., Mlaouhi, K., & Gadhoumi, B. (2018). Évaluation de la satisfaction au sein des urgences d'un centre hospitalier universitaire. Actes du XXIXème Congrès de l'Association Latine pour l'Analyse des Systèmes de Santé (CALASS 2018).

Mbarek, H. B., Aissaoui, N., Layeb, S. B., & Hadj-Alouane, A. B. (2021). Analyse de la chaine de valeur pour améliorer le flux de patients d'un service de consultations externes tunisien. La Tunisie Médicale, 99(5), 531.

Mejri, I., Layeb, S. B., Aissaoui, N., & Kaabar, M. Y. (2024). Inventory Management Performance of Medical Analysis Laboratory in a Public Hospital. In Hospital Supply Chain: Challenges and Opportunities for Improving Healthcare (pp. 267-283). Cham: Springer Nature Switzerland.

Santos, E. D. S., Gonçalves, K. M. D. S., & Mol, M. P. G. (2019). Healthcare waste management in a Brazilian university public hospital. Waste Management & Research, 37(3), 278-286.

Salem, B. (2021). Principal Component Analysis (PCA). La Tunisie Medicale, 99(4), 383-389.

Ter Hussain, A., Sial, M. S., Usman, S. M., Hwang, J., Jiang, Y., & Shafiq, A. (2019). What factors affect patient satisfaction in public sector hospitals: Evidence from an emerging economy. International journal of environmental research and public health, 16(6), 994.

Özer, L., Başgöze, P., & Karahan, A. (2017). The association between perceived value and patient loyalty in public university hospitals in Turkey. Total Quality Management & Business Excellence, 28(7-8), 782-800.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Simulating a healthcare system to optimize investment strategies

ISALINE BARET[1,2,*], NHAN QUY NGUYEN[1,2,*], YASSINE OUAZENE[1,2,*], FAROUK YALAOUI[1,2,*]

[1] Chaire Connected Innovation
Université de Technologie de Troyes
TROYES, France

[2] Laboratoire Informatique et société numérique
Université de Technologie de Troyes
TROYES, France

**isaline.baret@utt.fr, nhan_quy.nguyen@utt.fr, yassine.ouazene@utt.fr, farouk.yalaoui@utt.fr*

***Abstract* – Healthcare systems are facing increasing challenges, resulting in higher demand and growing inequalities in access to care. To remain viable, these systems must adapt. This research aims to develop a framework for an optimization model based on simulation to strengthen the long-term resilience of healthcare systems. The simulation replicates the dynamics of a regional healthcare system, considering population health status, patient preferences, and the vulnerability of facilities to disruptions and capacity constraints. We propose a macroscopic simulation model that illustrates patient flow and reallocation between facilities in the event of a facility failure. This tool is designed to support policymakers in prioritizing investments across healthcare facilities based on current conditions and projected demand.**

***Keywords* – healthcare system resilience; simulation-based optimization; resource allocation; patient choice**

1 INTRODUCTION

Healthcare systems play a crucial role, they provide essential services that ensure the physical and mental well-being of individuals. In 2014, the European Commission already noted that all European healthcare systems were facing growing challenges: increasing healthcare costs; an aging population correlated with a rise in chronic diseases and multiple morbidities, leading to higher demand for healthcare; shortages and unequal distribution of healthcare professionals; health inequalities and injustices in access to care (European Commission, 2014). This is exemplified in France where the demand for care has significantly risen in recent years, with a 4.88% increase in hospitalized patients between 2014 and 2019 (Les établissements de santé - édition 2021, 2021). Healthcare systems will need to adapt to stay viable. Countries all around the world are undertaking reforms and investment plans to strengthen their healthcare systems. Despite financial challenges, states are actively mobilizing to bolster their healthcare infrastructure. In France, for example, as early as 2020, the Ségur de la santé consultations led to historic agreements to enhance healthcare system. These agreements included major initiatives such as a €19 billion investment in healthcare, the recruitment of 15,000 healthcare personnel, funding for the opening or reopening of 4,000 "on-demand" beds, and empowering regions with significant healthcare investment tools to address health inequalities (*Ségur De La Santé Les Conclusions*, 2020). In 2023, the Government of Canada allocated $196.1 billion over 10 years to healthcare to work on four health priorities: expanding access to health services, including in rural and remote areas; supporting healthcare workers and reducing surgical backlogs; increasing access to quality mental health and substance use services; and modernizing healthcare systems through standardized health data and digital tools (Travailler ensemble pour améliorer les soins de santé pour les Canadiens, 2023).

Research on viability of supply system has gain importance in the last decade. Simulation tools are often used to model complex systems, such as manufacturing systems or supply system. By simulating scenarios, decision-makers can develop robust action plans and optimize the resilience of their systems. Simulation-based optimization integrates simulation models into the optimization process, simulation results are used to guide optimization decisions and improve overall system performance.

The goal of this research is to build an optimization model based on simulation for enhancing the resilience of healthcare system. In the following, we use the term healthcare system to depict a network of equivalent facilities in terms of type of care they are providing. We propose a macroscopic simulation model to illustrate patient flow in the system and reallocation between facilities in case of a healthcare facility failure. Simulations will be run with different configuration of facilities disruption rate linked to investments made on facilities to highlight which facilities need the most investment to maintain system stability and prioritize decisions according to the available budget.

The remainder of this paper is structured as follows. Section 2 presents a literature review on the fortification problem. Section 3 outlines the proposed simulation and a Taguchi analysis for simulation stabilization, and section 4 described the

optimization by simulation process. Finally, the paper concludes with a discussion of key insights and directions for future research.

2 LITERATURE REVIEW

Simulation models have been widely used in the planning of various healthcare services. They have been widely used to support decision-making at operational level (He et al., 2019; Salmon et al., 2018). The most common themes are process improvement(Nas & Koyuncu, 2019; Ragab et al., 2013), planning and resource allocation, dynamic configuration/ reconfiguration of services (Izady et al., 2024), as well as monitoring of the patient pathway to improve care (Panicker & Arun, 2018; Ragab et al., 2013).

We note that simulation tools are less used at tactical or strategic levels in a healthcare system, whereas in other fields such as supply chain, these tools are widely used to configure/reconfigure these networks at strategic levels(Ivanov & Dolgui, 2021). There are, however, a few notable examples, such as (Cardoso et al., 2012) who propose a simulation model based on a Markov cycle tree structure to predict annual demand for Long-term services in order to plan these services. They emphasize the importance of taking into account patients' health status and different socioeconomic group, and evaluate a system in terms of distance traveled and patients waiting. (Doi et al., 2017) have built a simulation to assess the balance between future demand and supply of healthcare services, by estimating the future number of hospitalized patients in each zone. They model future population changes and patient behavior, supposing that if patients have a choice between accessible facilities, they tend to go to large, well-equipped hospitals and hospitals as close to home as possible. (Kucukyazici et al., 2020) build a discrete-event simulation incorporating patient preferences into an optimization model for the design of cancer screening facility networks to maximize expected participation. (Teymourifar, 2024) considers a healthcare system, which includes public and private hospitals. In this type of system, although many patients prefer public hospitals because of their affordability, they want to go to a private hospital because of the better quality of care. The authors assume that the government can offer private hospitals a new contract, under which it provides more subsidies to private hospitals, making the price more affordable. They use a simulation-based optimization to determine the new contracts based on the concept of resectorization, which is the time needed to travel to hospitals and the waiting time inside the hospital for each patient. However, they suppose unlimited capacity and failure proof facilities. (Xing & Lu, 2024) proposes a network-based simulation for assessing the robustness of healthcare access by incorporating a cascading failure mechanism.

A number of studies have been carried out to improve healthcare systems, focusing in particular on patient access to care and system sizing. To the best of our knowledge, no research has combined optimization and simulation to improve a healthcare network by taking into account on one hand the health status of the population and patient preferences and on the other hand the vulnerability of facilities to disruption and capacity. We propose an approach for finding an optimal investment portfolio to improve the viability of existing healthcare system based on simulation. We use the most common performance indicators to evaluate our model, which are distance traveled by patients to measure accessibility (Kucukyazici et al., 2020; Teymourifar, 2024; Xing & Lu, 2024) and patients on hold (Doi et al., 2017; Kucukyazici et al., 2020).

3 SIMULATION

3.1 Simulation Description

We propose a simulation to replicate the dynamics of a regional healthcare system, with the goal of planning improvements in the coverage. First, the simulation requires a set of input parameters, which are variable elements derived from the healthcare system under study. We assume that the population in a region is divided into clusters; the set of clusters is denoted as $\mathcal{I}$. These clusters can be defined based on a combination of factors such as geographic proximity, age, and health conditions. Each cluster *i* is characterized by several parameters: its size h_i, representing the number of people in the cluster; its location; and a health status μ_i, which represents the average health condition of the people in the cluster. The health status is expressed as a probability of being healthy, ranging from 0 to 1, 1 is being perfectly healthy and 0 is needing constant care. For example, clusters with older populations tend to have lower health status values. Representation of the population in clusters is an assumption made in several studies, and is essential for data anonymity and retrieval (Doi et al., 2017). We also have predefined healthcare facilities, with a certain capacity λ_k, i.e the number of patient they can treat at each period *t*. Moreover, there is also a small chance that the facility is totally unavailable during the period *t* due to disruption, this is the disruption rate q_k. Each person has preferences over the healthcare facilities. The set K_i represents the set of admissible health facilities for the people in the cluster *i*. The set K_i is ordered by descending order of preferences. The preferences are based on an utility d_{ik} (ties are broken arbitrarily) between the patient of cluster *i* and facility *k*, we suppose that the lower d_{ik} is, the more attractive the facility is, the utility can be for example the travel distance between the cluster and the facility. All this input parameters are resumed in table 1.

Tableau 1: Input parameters

Parameters	Description	Characteristics
$\mathcal{K}$	Set of facilities	Indexed by k=1, … K
$\mathcal{I}$	Set of patients	Indexed by i=1, …I
T	Time Horizon	Indexed by t=1,…T
q_k	Disruption rate for facility *k*	$0 \leq q_k \leq 1$
λ_k	Capacity of facility *k*	$\lambda_{kt} \in \mathbb{N}$
h_i	Cluster i population	
μ_i	Cluster i health status	
d_{ik}	Utility of patient *i* going to facility *k*	
K_i	Set of admissible facilities for *i*	Set ordered by preference

We run the simulation over a time horizon T. A period *t* can be a day or week, etc. At each time step *t*, the simulation proceeds through the following steps:

- Generate patients in predefined areas, known as clusters.

- Determine if healthcare facilities are running or not.
- Allocate patients to healthcare facilities based on preference and availability.
- Update the performance indicators

The first step is the patients generation, which involves randomly creating $P = \sum_{i=1}^{I} h_i(1-\mu_i)$ patients. Each patient correspond to a specific cluster and inherits the characteristics of that cluster. The larger the cluster or the lower its health status, the more frequently patients will be generated from it. First, the average number of patients must be determined for each cluster, which gives the total number of potential patients. A random number *u* is drawn between 0 and this maximum number of patients. To find the cluster to which this future patient belongs, the list of clusters must be scanned and when the cumulative sum of the requests from the clusters exceeds *u*, the patient's cluster is then identified and it will be possible to create this patient. Newly generated patients are added to the existing list of patients waiting for care from previous iterations.

Second, healthcare facilities undergo random periods of unavailability based on their disruption rates. At each time step, a facility's availability is decided randomly and the variable a_{kt} is set to 1 if the facility is available at time *t*, or 0 otherwise.

Patients are then assigned to available healthcare facilities. A patient is directed to a facility based on his preference and the facility's availability. K_p is the ordered set of admissible facilities for patient *p*. A healthcare facility is considered available if a_{kt}= 1 and the waiting queue L_{kt}, corresponding to patients already directed to facility *k* at period *t*, is not full, i.e., $L_{kt} \leq \lambda_k$. As a result, patients are directed to the first available facility in their preference list. If none of the facilities in K_p are available, the patient *p* will be placed on hold and will attempt to seek care later. This assignment process is crucial for updating performance indicators, which are calculated as the average outcomes across all simulation stages.

The algorithm 1 gives the pseudo-code of the simulation.

Tableau 2: Simulation's parameters

Parameters	Description	Characteristics
a_{kt}	Availability of facility *k* at time *t*	$a_{kt} \in \{0,1\}$
L_{kt}	List of patients assigned to *k* at time *t*	

We use two performance indicators to evaluate the performance of the simulated healthcare system inspired by the existing literature. The first indicator is the mean utility of patients to get care. The second is the number of patient that are on hold for care at the end of step *t*.

The set $P(t)$ is the set of patients in the system at the time *t* (newly generated patients and patients on hold from the previous time step *t-1*). To compute the performance indicators, first, we define the variable:

$$z_{pkt} = \begin{cases} 1 \; if \; facility \; k \; treats \; p \\ 0 \; otherwise \end{cases} \qquad \forall p \in P(t)$$

Algorithm 1 Simulation Pseudocode

```
L = []
for t in range T do
    Generate P patients, P_1, ..., P_p
    Add the P patients to L
    Simulate availability of facilities
    for i in range P do
        for k in range len(K_i) do
            If K_i(k) is available and |L_K| ≤ λ_K:
                Assign P_i to facility K_i(j)
            Else:
                P_i.wait = True
        end for
    end for
    Remove from L the assigned patients
    For all k, L_K = ∅
end for
Update the performance indicators
```

The first performance indicator *D(t)* corresponding to the mean travel distance by patients during the step *t* is computed as follow:

$$D(t) = \frac{1}{|P(t)|} \sum_{p \in P(t)} \sum_{k \in K_p} d_{pk} \, z_{pkt}$$

The second performance indicator *W(t)* is the number of patients on hold and is computed as follow:

$$W(t) = \sum_{p \in P(t)} \prod_{k \in K_p} (1 - z_{pkt})$$

After running the simulation over a large number of iterations, we obtain the average system performance based on our two key indicators.

$$D = \frac{\sum_{t=1}^{T} D(t)}{T}$$

$$W = \frac{\sum_{t=1}^{T} W(t)}{T}$$

3.2 Taguchi analysis for simulation stabilization

To test the stability of our simulation, the Taguchi method is used. The Taguchi method was developed by Dr. Genichi Taguchi, who introduced a method for reducing process variation through robust experimental design. The experimental design proposed by Taguchi involves the use of orthogonal tables to organize the parameters affecting the process and the levels at which they should vary. To apply the Taguchi method, the first step is to identify the factors and interactions likely to influence test results. Our aim is to test the stabilization of the simulation and thus minimize the deviation from the average scenario. Then, we determined 3 parameters that could have an influence: the number of iterations (size of the time horizon), the number of tests (simulation launches) and the warm-up time. The warm-up time refers to the initial period during which simulation results can be influenced by the starting conditions

and are not yet representative of the long-term behavior of the simulated system. For each of the three parameters we have three levels. The number of iterations varies from 1000 to 3000, the number of tests from 100 to 300, and the warm-up time from 15% to 25%. As we have 3 factors and 3 levels, we use a Taguchi L9 table. For each experiment, we compute the *nominal Signal-to-Noise ratio*. This measure is appropriate when the desired result is consistency around a target value with minimum deviation.

The method is tested on a random instance generated as follows: on a rectangle corresponding to a territory we generate the location of 10 healthcare facilities and 200 population clusters, enabling us to compute the Euclidean distance between clusters and facilities. The preferences are based on distance. The demand for each cluster is also randomly generated between two bounds (here 10 and 20). Finally, the probability of failure is identical for all establishments (here 0.3) and capacity is the demand when all is well with a small margin. Figures 1, 2 and 3 shows the evolution of the S/N ratio as a function of different parameter levels for the two objectives we are seeking to minimize. The higher the S/N ratio, the better. First, we can see that increasing the number of tests and the warm-up time has no impact on the S/N ratio, so it doesn't seem worthwhile increasing the number of tests or the warm-up time to stabilize the simulation. The important parameter is the number of iterations. Similarly, the increase in the ratio between level 2 and level 3 of the number of iterations is less significant than between level 1 and 2. Due to the increase in computation time, we can state that the most advantageous configuration in our case is 600 iterations, 100 tests and 15% warm-up.

Figure 1: Taguchi analysis of the level of iterations

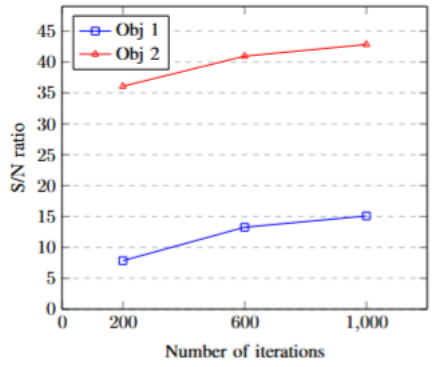


Figure 2: Taguchi analysis of the level of tests

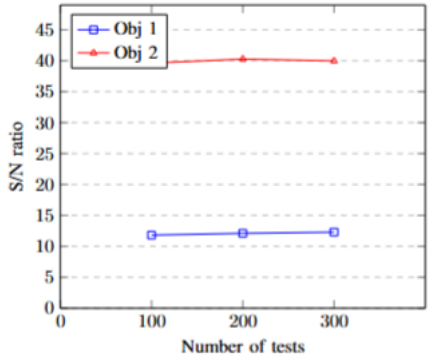
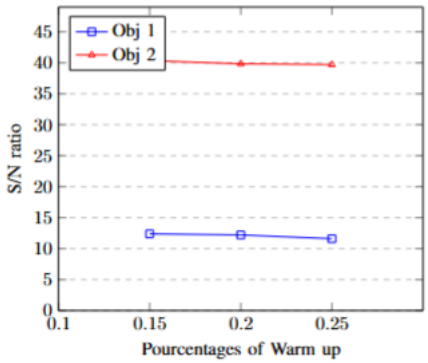


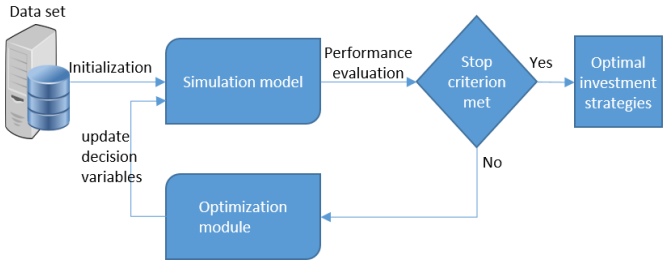
Figure 3 : Taguchi analysis of the level of warm up



4 OPTIMIZATION BY SIMULATION

To enhance an existing healthcare system at the facility level, various mitigation strategies can be implemented. These strategies may include purchasing new equipment to increase the number of patients treated daily, replacing outdated equipment to decrease the facility's failure rate or recruiting additional staff to boost the service rate. Each mitigation strategy comes with its own costs and outcomes. Given the constraints of an overall budget that does not allow all possible mitigation strategies, the objective is to optimally allocate funds across healthcare facilities to minimize the two performance indicators.

Figure 4: Optimization by simulation



The process of optimization by simulation is defined as depicted in figure 4. The idea is to use simulation as input into an optimization model to determine an investment portfolio that will minimize both performance indicators. The simulation will calculate the scores for each investment strategy, which are the performance indicators D and W defined in section 3.1.

First, we need to set the environment of the simulation based on data from the existing healthcare system. We know that increasing the investment level l for a facility k results in a reduction of its unavailability rate, with $q_{kl} > q_{kl'}$ when l' > l, and may also increase its capacity, $\lambda_{kl} > \lambda_{kl'}$ when l' > l. We define an investment strategy as $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_K\}$, with ω_k the level of investment facility k. When an investment incurs at level l on a facility k, it incurs a cost c_{kl}. A feasible investment strategy must respect the constraint that the amount of money spent on strengthening the various institutions must not exceed the total available budget. Given the investment strategy ω, the capacity and disruption rate of a facility k are respectively λ_k^{ω} and q_k^{ω}, corresponding the capacity or disruption rate when an investment occurs at the facilities. Then we obtain the failure

rates vector $Q^{\omega} = \{q_1^{\omega}, q_2^{\omega}, \dots, q_K^{\omega}\}$ and the capacity vector $\Lambda^{\omega} = \{\lambda_1^{\omega}, \lambda_2^{\omega}, \dots, \lambda_K^{\omega}\}$.

The scores $D(\omega)$ and $W(\omega)$ are derived by running the simulation under the configuration of failure rate vector Q^{ω} and service rate Λ^{ω}. We run the simulation with different feasible investment strategy ω in order to find the configuration that minimize both performance indicators $D(\omega)$ and $W(\omega)$. The objective is to minimize both metrics; however, these objectives are inherently conflicting. Specifically, a patient on hold has a travel distance of zero, meaning that reducing the number of waiting patients may increase overall travel distance, and vice versa. Hence, the model should be studied as a bi-objective model.

Optimization methods like full enumeration approach, gradient-based methods, genetic algorithm, Simulated annealing, or particle swarm optimization can be implemented to solve the problem.

5 Conclusion

In simulations where input data play a critical role, relying on real-world data becomes essential to ensure the model's accuracy and relevance. The ongoing digital transformation of healthcare systems facilitates this by improving data availability and quality across facilities. Leveraging these data enables informed, evidence-based decision-making, enhancing the reliability of simulation outcomes. Moreover, it strengthens transparency and accountability, as public authorities can justify strategic choices—such as resource allocation—based on objective, verifiable information drawn from actual healthcare system performance. The input parameters of the simulation can be adjusted to reflect demographic projections, allowing the model to account for expected changes in population size, age structure, and geographic distribution. This dynamic adaptability ensures that the simulation remains relevant for long-term planning. Moreover, the set of healthcare facilities considered in a patient's preferences does not necessarily include all available providers. For example, distance limitations can be imposed, meaning that patients can only go to facilities within a certain geographical range. As a result, patients living in remote or peripheral areas are more likely to experience delays or remain in a state of unmet demand due to limited accessible options.

In this research, we propose a simulation of a healthcare system that accounts for, on one hand, the health status of the population and patient preferences, and on the other hand, the vulnerability of healthcare facilities to disruption and their capacity constraints. This simulation serves as a decision-support tool to optimize a portfolio of mitigation strategies aimed at enhancing the system's resilience to future challenges, particularly in terms of accessibility and unmet demand. By simulating various scenarios based on different investment configurations, we are able to determine the most impactful strategies.

Future research perspectives should focus on developing an optimization algorithm for this problem and then implementing this model in a real-world context to provide further validation and refinement of our approach.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the Industrial Chair Connected-Innovation and its industrial partners (https://chaire-connected-innovation.fr), as well as the Grand Est region in France as part of a collaborative project for Research, Development and Innovation under agreement number 23P07205.

6 References

Cardoso, T., Oliveira, M. D., Barbosa-Póvoa, A., & Nickel, S. (2012). Modeling the demand for long-term care services under uncertain information. *Health Care Management Science*, *15*(4), 385-412. https://doi.org/10.1007/s10729-012-9204-0

Doi, S., Ide, H., Takeuchi, K., Fujita, S., & Takabayashi, K. (2017). Estimation and Evaluation of Future Demand and Supply of Healthcare Services Based on a Patient Access Area Model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *14*(11), 1367. https://doi.org/10.3390/ijerph14111367

European Commission. (2014). . *Communication from the Commission : On Effective, Accessible and Resilient Health Systems.*

He, L., Chalil Madathil, S., Oberoi, A., Servis, G., & Khasawneh, M. T. (2019). A systematic review of research design and modeling techniques in inpatient bed management. *Computers & Industrial Engineering*, *127*, 451-466. https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.10.033

Ivanov, D., & Dolgui, A. (2021). A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0. *Production Planning & Control*, *32*(9), 775-788.

Izady, N., Arabzadeh, B., Sands, N., & Adams, J. (2024). Reconfiguration of inpatient services to reduce bed pressure in hospitals. *European Journal of Operational Research*, *316*(2), 680-693. Scopus. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.02.008

Kucukyazici, B., Zhang, Y., Ardestani-Jaafari, A., & Song, L. (2020). Incorporating patient preferences in the design and operation of cancer screening facility networks. *European Journal of Operational Research*, *287*(2), 616-632. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.03.082

Les établissements de santé—Édition 2021. (2021). Direction de la recherche, des études, de l'évaluation et des statistiques.

Nas, S., & Koyuncu, M. (2019). Emergency Department Capacity Planning : A Recurrent Neural Network and Simulation Approach. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, *2019*. Scopus. https://doi.org/10.1155/2019/4359719

Panicker, V. V., & Arun, P. P. (2018). *Simulation model for the analysis of Patient Scheduling Process in Radio Diagnosis Department*. 2018 IEEE International Conference on System, Computation, Automation and Networking, ICSCA 2018. Scopus. https://doi.org/10.1109/ICSCAN.2018.8541195

Ragab, M. A. F., Rashwan, W., Abo-Hamad, W., & Arisha, A. (2013). Using modelling and simulation to improve elderly care in ireland : A case study. *International Journal on Advances in Life Sciences*, *5*(1-2), 89-102. Scopus.

Salmon, A., Rachuba, S., Briscoe, S., & Pitt, M. (2018). A structured literature review of simulation modelling

applied to Emergency Departments : Current patterns and emerging trends. *Operations Research for Health Care*, *19*, 1-13. https://doi.org/10.1016/j.orhc.2018.01.001

Ségur De La Santé Les Conclusions. (2020).

Teymourifar, A. (2024). Simulation-based optimization for resectorization in healthcare systems. *Journal of Simulation*, *18*(3), 311-330. Scopus. https://doi.org/10.1080/17477778.2022.2152395

Travailler ensemble pour améliorer les soins de santé pour les Canadiens. (2023). Santé Canada, Gouvernement du Canada.

Xing, J., & Lu, S. (2024). A network-based simulation framework for robustness assessment of accessibility in healthcare systems with the consideration of cascade failures. *Simulation*. Scopus. https://doi.org/10.1177/00375497241229750

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Set-based modeling formalism for scheduling problems with Hexaly

LEA BLAISE

[1] Hexaly
251 Boulevard Pereire, 75017 Paris, France
lblaise@hexaly.com

Résumé **– Hexaly est un solveur d'optimisation global de type *model & run* basé sur des techniques exactes et heuristiques. On s'intéresse ici à ses performances sur les problèmes d'ordonnancement de façon générale (problèmes présentant des contraintes de précédence et ressources disjonctives ou cumulatives, minimisant le makespan, la somme pondérée des retards, etc.). Le formalisme de modélisation d'Hexaly permet d'exprimer facilement de nombreux problèmes d'ordonnancement académiques et industriels, en n'utilisant que des opérateurs génériques. Ces modèles, construits à partir de variables d'intervalles et de listes, ont l'avantage d'être compacts, et permettent ainsi au solveur de traiter des problèmes de grande taille. En effet, les algorithmes implémentés au sein d'Hexaly exploitent cette modélisation et lui permettent d'obtenir de très bonnes performances sur divers problèmes d'ordonnancement : moins de 2% d'écart à l'optimum en une minute et jusqu'à 2000 tâches sur des problèmes classiques comme le Job Shop, le Flexible Job Shop, l'Open Shop, ou le Resource-Constrained Project Scheduling Problem. On montrera également que les modèles écrits dans le formalisme ensembliste d'Hexaly sont plus compacts que leurs équivalents dans les formalismes de programmation linéaire ou par contraintes utilisés par d'autres solveurs classiques, comme Gurobi ou CP Optimizer.**

Mots clés **- (5 au maximum) ordonnancement, solveur, modélisation**

Abstract **– Hexaly is a *model & run* global optimization solver based on exact and heuristic techniques. In this talk, we will focus on its performance on scheduling problems in general (problems with precedence constraints and disjunctive or cumulative resources, minimizing makespan, weighted sum of tardiness, etc.). Hexaly's modeling formalism makes it very straightforward to express many academic and industrial scheduling problems, using only generic operators. These models, based on interval and list decision variables, have the advantage of being compact, enabling the solver to handle large-scale problems. Indeed, the algorithms implemented within Hexaly exploit this modeling and enable it to achieve very good performance on various scheduling problems: less than 2% optimality gap in one minute with up to 2000 tasks on classical problems such as the Job Shop, the Flexible Job Shop, the Open Shop, or the Resource-Constrained Project Scheduling Problems. It will also be shown that models written in Hexaly's set-based formalism are more compact than their equivalents in the linear or constraint programming formalisms used by other classical solvers, such as Gurobi or CP Optimizer.**

Keywords **– scheduling, solver, modeling**

CIGI QUALITA MOSIM 2025
An adaptive ILS metaheuristic for the job shop scheduling problem with Time-lags

SOUFIANE AALLAOUI[1,2], AHLAM AZZAMOURI[1], LIBO REN[3] NIKOLAY TCHERNEV[1,2]

[1] EMINES, School of Industrial Management, Mohammed VI Polytechnic University
Lot 660, 43150 Benguerir, Morocco
{soufiane.aallaoui, ahlam.azzamouri}@emines.um6p.ma

[2] LIMOS (UMR CNRS 6158), Clermont Auvergne University
1 rue de la Chebarde, 63177 Aubière Cedex, France
nikolay.tchernev@uca.fr

[3] LARGEPA, Paris-Panthéon-Assas University
1 rue Guy de La Brosse, 75005 Paris, France
Libo.ren@u-paris2.fr

Résumé – Les contraintes de Time-lag, qui imposent des délais spécifiques entre les opérations, augmentent la complexité du problème classique du Job Shop (JSP) et sont essentielles dans des secteurs tels que la fabrication et l'exploitation minière. Cet article propose un algorithme de Recherche Locale Itérée (ILS) avec une procédure de réparation pour résoudre le problème de JSP avec des Time-lags (JSPTL). La procédure de réparation détecte les violations des contraintes de Time-lag qui génèrent des cycles dans le graphe conjonctif-disjonctif et rétablit dynamiquement la faisabilité de l'ordonnancement en ajustant les arcs du graphe, modifiant ainsi la séquence des opérations. Cette approche permet à l'ILS d'explorer plus efficacement les régions de solutions réalisables tout en respectant l'ensemble des contraintes. L'approche proposée a été testée sur des instances de référence du JSPTL et comparée aux méthodes les plus avancées. Les résultats montrent que l'ILS amélioré atteint des solutions optimales ou quasi-optimales tout en maintenant des temps de calcul comparables. Ces résultats démontrent le potentiel prometteur de l'algorithme proposé pour les problèmes d'ordonnancement sous contraintes temporelles dans les applications industrielles.

Abstract – Time-lag constraints, requiring specific delays between operations, add complexity to the traditional Job Shop Scheduling Problem (JSP) and are critical in industries such as manufacturing and mining. This paper presents an Iterated Local Search (ILS) algorithm with a repair procedure to tackle the Job Shop Scheduling Problem with Time-lags (JSPTL). The proposed repair procedure identifies violations of Time-lag constraints that generate cycles in the conjunctive-disjunctive graph and dynamically restores schedule feasibility by adjusting the graph arcs, thereby modifying the sequence of operations. This approach enables ILS to navigate feasible regions more effectively while respecting Time-lag constraints. The proposed approach was tested on benchmark JSPTL instances and compared to the state-of-the-art methods. Results indicate that the enhanced ILS achieves optimal or near-optimal solutions while maintaining comparable computational times. The result demonstrates that the proposed algorithm has promising potential for time-constrained scheduling problems in industrial applications.

Mots clés – **Problème de Job Shop, Time-lags, Métaheuristique, Procédure de réparation.**
Keywords – **Job Shop Scheduling problem, Time-lags, Metaheuristic, Repair procedure.**

1 INTRODUCTION: GENERAL CONTEXT AND RELATED WORKS

The Job Shop Scheduling Problem with Time-lags introduces an additional layer of complexity to the classic Job Shop Problem (JSP) by incorporating time-based constraints that reflect real-world dependencies between operations. Time-lag (TL) constraints are essential for imposing delays between operations, either as minimum or/and maximum intervals, to reflect real-world requirements. This type of constraint is widely used to model dependencies in industrial processes where precise timing is critical, such as manufacturing, chemical processing, and food production (Neumann et al., 2002). Minimum time-lag constraints ensure that operations follow a mandatory delay (e.g., transit times between operations), while maximum Time-lags restrict the delay to prevent resource idling or spoilage of materials. These timing constraints may pose additional computational difficulties.

In the JSPTL, a set of n jobs $J = \{1, \dots, n\}$ must be scheduled, where each job consists of a sequence of j_i operations $O_i = \{O_{i,1}, \dots, O_{i,j_i}\}$. These operations are processed on a set of n_M machines $M = \{m_1, \dots, m_{n_M}\}$, with each operation $O_{i,j}$ assigned to a specific machine m_k for a fixed processing time $p_{i,j}$ without interruption. The incorporation of TL constraints complicates the scheduling process. Operations must not only follow a predefined sequence but also respect strict timing intervals. Specifically, each operation $O_{i,j+1}$ must start within a defined time window relative to its predecessor $O_{i,j}$. This interval is expressed as $[t_{O_{i,j}} + p_{i,j} + T^{min}_{O_{i,j},O_{i,j+1}}, t_{O_{i,j}} + p_{i,j} + T^{max}_{O_{i,j},O_{i,j+1}}]$, where $t_{O_{i,j}}$ represents the starting time of operation $O_{i,j}$, $T^{min}_{O_{i,j},O_{i,j+1}}$ and $T^{max}_{O_{i,j},O_{i,j+1}}$ denote the minimum and maximum time-lags, respectively, between operations $O_{i,j}$ and $O_{i,j+1}$.

Incorporating TL constraints significantly limits scheduling flexibility, which makes optimization approaches less effective, especially when managing schedules constrained by narrow time windows. (Wikum et al., 1994) showed that even single-machine problems with TL constraints are often NP-hard. Branch-and-Bound techniques have been applied to address this problem, with (Brucker et al., 1999) solving single-machine scheduling problems with minimal and maximal TLs. For multi-machine and more complex systems, heuristic and metaheuristic approaches, such as local search and genetic algorithms, have been favored due to their ability to find good-quality solutions within a reasonable time limit ((Hurink and Keuchel, 2001); (Fondrevelle et al., 2006)).

Among existing works on the JSPTL, several approaches have adopted the concept of relaxed schedules to explore the search space more effectively using a relaxation of the Time-lag constraints during the solution exploration phase. (Caumond et al., 2008) proposed a memetic algorithm based on the disjunctive graph model, which uses a penalty linked to the number of constraints violated to favor obtaining feasible solutions quickly. A basic repair procedure is used, which attempts to restore feasibility by shifting the problematic operation to the right in the sequence. (González et al., 2015) introduced a scatter search with path relinking to tackle sequence-dependent setup times and TLs simultaneously. It minimizes the makespan and the number of unchecked TL constraints to obtain a feasible solution with good quality. Solutions with unchecked TL constraints are named relaxed schedules.

Other approaches accept only feasible coding of solutions during the local search procedure; for instance, (Artigues et al., 2011) addressed JSPTL by using a branch-and-bound algorithm enhanced with constraint propagation techniques to improve efficiency in handling TL constraints. More recent studies have focused on hybrid metaheuristics, combining different techniques to improve solution quality and computational efficiency in handling the JSPTL. (Harrabi et al., 2021) introduced a hybrid biogeography-based optimization approach designed to address both the JSP with generic TLs and the JSPTL. The quality of results achieved by their approach is compared with other methods available in the literature.

One of the difficulties of the JSPTL is to resolve the infeasibility and enhance the quality of the solution at the same time. A key element in the design of approaches for the JSPTL is to guarantee meeting the required constraints and good quality solutions, which not only ensure feasibility but also aim to improve the overall quality of the schedule.

In this paper, we propose an Iterated Local Search (ILS) algorithm with a repair procedure to tackle the JSPTL. ILS is a metaheuristic that explores the feasible solution space by repeatedly applying local search and perturbation to overcome local optima. In case of infeasibility of an explored neighbor solution, the repair procedure is launched to identify and address cycles in the disjunctive graph, restoring feasibility and enhancing solution quality with movements to the left in the solution sequence. The proposed algorithm is tested on JSPTL benchmarks, and it allows achieving optimal or near-optimal results, with competitive computation times compared to leading methods. The result demonstrates its effectiveness for scheduling in industries where precise timing is essential.

The remainder of this article is structured as follows: Section 2 introduces the mathematical model and the graphical representation of the problem. Section 3 details the proposed repair procedure and its integration into the ILS framework. Section 4 presents the results of our computational experiments, and Section 5 concludes with insights and potential directions for future research.

2 JOB SHOP WITH TIME-LAGS: MODELLING

The JSPTL is a generalization of the JSP by including the minimum and maximum time-lag constraints between each pair of operations of the same job.

The following notations are used throughout this paper:

Indices and sets

i, j, k	Jobs, operations, and machines indices
J, Ω, M	Jobs, operations, and machines sets
Ω_k	Set of operations processed on machine k
O_i	Set of operations of the job i

Parameters

$p_{i,j}$	The duration of operation $O_{i,j}$
$T^{min}_{O_{i,j},O_{i,j+1}}$	Minimal Time-lag between $O_{i,j}$ and $O_{i,j+1}$

$T^{max}_{O_{i,j},O_{i,j+1}}$ Maximal Time-lag between $O_{i,j}$ and $O_{i,j+1}$

H Large positive number

Decision variables

C_{max} Makespan

$t_{O_{i,j}}$ Starting time of operation $O_{i,j}$

$x_{(i,j),(i',j')} = \begin{cases} 1 \text{ if } O_{i,j} \text{ is processed before } O_{i',j'} \\ 0 \text{ otherwise} \end{cases}$

An integer model for the JSPTL can be defined as follows (Lacomme et al., 2011):

Objective function

$$min(Cmax) \quad (1)$$

Subject to

$$C_{max} \geq t_{O_{i,j}} + p_{i,j}\,, \qquad \forall\, O_{i,j} \in \Omega \quad (2)$$

$$t_{O_{i',j'}} \geq t_{O_{i,j}} + p_{i,j} - H.(1 - x_{(i,j),(i',j')}), \quad \forall\, O_{i,j}, O_{i',j'} \in \Omega_k, \forall k \in M \quad (3)$$

$$t_{O_{i,j}} \geq t_{O_{i',j'}} + p_{i',j'} - H.x_{(i,j),(i',j')}, \quad \forall\, O_{i,j}, O_{i',j'} \in \Omega_k, \forall k \in M \quad (4)$$

$$t_{O_{i,j+1}} \geq t_{O_{i,j}} + p_{i,j} + T^{min}_{O_{i,j},O_{i,j+1}}\,, \qquad \forall O_{i,j}, O_{i,j+1} \in \Omega \quad (5)$$

$$t_{O_{i,j+1}} \leq t_{O_{i,j}} + p_{i,j} + T^{max}_{O_{i,j},O_{i,j+1}}\,, \qquad \forall O_{i,j}, O_{i,j+1} \in \Omega \quad (6)$$

$$t_{O_{i,j}} \geq 0\,, \qquad \forall\, O_{i,j} \in \Omega \quad (7)$$

$$x_{(i,j),(i',j')} \in \{0,1\}\,, \qquad \forall\, O_{i,j}, O_{i',j'} \in \Omega_k, \forall k \in M \quad (8)$$

The objective (1) is to minimize the makespan $Cmax$, the completion time of all jobs. Constraint (2) ensures $Cmax$ is larger than the completion time of each operation $O_{i,j}$, where $t_{O_{i,j}}$ is the start time and $p_{i,j}$ is the processing time. Constraints (3) and (4) enforce non-overlapping of operations on the same machine, each considering the opposite ordering of $O_{i,j}$ and $O_{i',j'}$. Constraint (5) sets a minimum delay $T^{min}_{O_{i,j},O_{i,j+1}}$ between operations $O_{i,j}$ and $O_{i,j+1}$, while constraint (6) enforces a maximum delay $T^{max}_{O_{i,j},O_{i,j+1}}$ between them. Constraint (7) requires non-negative start times for each operation, and constraint (8) defines binary decision variables to control the ordering of operations on a given machine *k*.

For heuristic/metaheuristic approaches, disjunctive graphs are commonly used to model JSPTL. Initially introduced by (Roy and Sussmann, 1964) for the JSP and later adapted for JSPTL by (Caumond et al., 2008), the disjunctive represents operations as nodes. Precedence constraints are shown as directed arcs weighted by $p_{i,j} + T^{min}_{O_{i,j},O_{i,j+1}}$, ensuring minimum delays between consecutive operations of a job. Maximum TLs are represented using reverse arcs with weights $-(p_{i,j} + T^{max}_{O_{i,j},O_{i,j+1}})$, imposing upper limits on delays. Disjunctive arcs connect operations that share the same machine, representing sequencing constraints. The source and sink are two dummy operations included in the graph to denote the start and completion of the schedule.

A solution of the JSPTL determines the start time of each operation, and it can be visualized in Gantt charts. For heuristic/metaheuristic approaches, a solution is encoded as a set of operations. The Bierwirth vector is widely adopted for solution coding, as it compactly represents operation sequences. Originally introduced by (Bierwirth, 1995), the vector lists the jobs in the order of their operations. For example, the vector {1,3,1,2,2,1,3,3,2} corresponds to a specific operation sequence for three jobs, each with three operations. Time-lag constraints are applied to evaluate feasibility, and violations, such as cycles in the disjunctive graph, indicate infeasible solutions.

In the following section, we present a repair procedure designed to systematically address TL constraint violations and transform solutions into feasible ones. After detecting cycles in the Bierwirth vector through evaluation with TLs (Algorithm 2), the repair process, described in §3.3, is applied to navigate the cycle arcs, adjusting operation order as needed.

3 THE PROPOSED ILS ALGORITHM FOR THE JSPTL

ILS is a metaheuristic that applies a local search iteratively to improve an initial solution as described by (Lourenço et al., 2019). It is frequently used to solve hard combinational optimization problems and is a powerful technique to find high-quality solutions (Lourenço et al., 2019). Here, we proposed an ILS algorithm with a repair procedure. The repair procedure allows transforming an infeasible solution coding into a feasible one by using operation swapping-based movements to eliminate cycles.

3.1 ILS algorithm

As shown in Algorithm 1, ILS starts from an initial randomly generated solution (line 1), and it iteratively refines the solution through neighborhood searches, using perturbations to explore the solution space. For the JSPTL, feasibility issues of solution coding arise frequently during neighbor solutions exploration due to time-lag constraints between operations. Integrating the repair procedure within ILS directly addresses these issues, ensuring each solution encountered remains feasible after each iteration.

After the generation of a random solution and evaluating it considering both minimum and maximum TLs (line 2), the solution is repaired if found infeasible (line 4). The initial feasible solution is stored as the best solution, S* (line 6). The main loop of ILS (lines 7-13) iteratively applies a perturbation (line 8) to explore the neighboring regions, then the neighbor S' is improved using the local search (line 10). If the improved neighboring solution has a makespan better than the current best solution S*, it replaces S* as the new best solution (lines 10-12). At the end, the algorithm returns the best found solution (line 14).

Algorithm 1: ILS algorithm

```
Input
   Data: data of the problem
   nb_it: number of iterations of ILS
Output
      S*: an improved solution
Begin
1.    VB<-Generate a random Bierwirth vector
2.    S <- Evaluate(VB)
3.    If S is infeasible then
4.      S <- Repair_Procedure(S)
```

```
5.    End if
6.    S* <- S
7.    For it=1 to nb_it Do
8.      S′ <- Perturbation(S)
9.      S′ <- Local_search(S′)
10.     If f(S′) < f(S*) then
11.       S* <- S′
12.     End if
13.   End For
14.   Return S*
End
```

3.2 Evaluation procedure

As illustrated in Algorithm 2, the evaluation procedure is done in two steps: it begins with an evaluation with minimum time-lags in the first step (line 1), before the maximum time-lags evaluation in the second step (lines 2-14). The first step is similar to the approach of (Caumond et al., 2008). The second uses a Boolean variable *Error_cycle* for cycle detection (line 2) and a set containing TL arcs that need to be checked (line 3). The algorithm then iterates over each arc in the set (lines 4-12), retrieving and checking the top arc (line 5). If the arc meets TL constraints, it skips further checks (lines 6-8). Otherwise, Algorithm 3 attempts to modify the starting time of related operations (line 9). If a cycle (infeasibility) is detected due to the violation of a Time-lag constraint, the variable *Error_cycle* is set to true (line 10), and the solution coding is not feasible in this case. The evaluated solution is returned with its feasibility status (line 14).

Algorithm 2: Evaluation with TLs

```
Input
   Data: data of the problem
   VB: a Bierwirth vector
Output
      S: an evaluated solution
Begin
1.    S <- Evaluate with TL^min(VB)
2.    Error_cycle <- false
3.    Initialize Set with arcs to check
4.    While Set is not empty Do
5.      arc_tl <- get top arc from Heap
6.      If arc_tl verifies TLs then
7.        Continue
8.      End if
9.      If (!Adjust_arc_date(S, arc_tl)) then
10.       Error_cycle <- true
11.     End if
12.   End While
13.   S.feasible <- !Error_cycle
14.   Return S
End
```

For a given arc with time-lag constraints on the disjunctive graph, Algorithm 3 adjusts the start time of an operation and propagates these adjustments across the graph. The current solution coding is infeasible in the case of the existence of a cycle during propagation. The algorithm starts by initializing an empty list to track processed arcs (line 1) and a priority queue with the problematic arc that violates TL constraints (line 2). The dominant node of this arc, identified as the starting node, is set as responsible for adjusting the start time of the connected node (line 3). The algorithm retrieves the top arc from the queue (line 5) and assigns roles to each node in the arc: a *source_node* that influences the timing of the *destination_node* (line 6). If the *destination_node* is the starting node, a cycle is detected and saved. The current solution coding is infeasible, and the algorithm returns *false* (lines 7-10). If no cycle is detected, the algorithm continues. Already-processed arcs are skipped (lines 11-13), while unprocessed arcs are added to the list of processed arcs (line 14). Adjustments are then applied based on arc type, nodes, and relevant dates (line 15), with these changes propagated to connected arcs, which are added to the queue for further evaluation (line 16). When all arcs are processed without any detected cycle (all time-lag constraints are respected), the algorithm returns *true*.

Algorithm 3: Adjust_arc_date

```
Input
   Data: data of the problem
      S: a solution
 arc_tl: Problematic arc
Output
   Feasible: Arc feasibility status
Begin
1.    List_arcs_covered <- Ø
2.    Initialize Queue with arc_tl
3.    Start_node<- dominant operation of arc_tl
4.    While Queue is not empty Do
5.      arc <- retrieve arc from Queue
6.      Determine Source_node & Destination_node
7.      If Destination_node = start_node then
8.        Save cycle in S
9.        Return false
10.     End if
11.     If arc in List_arcs_covered then
12.       Continue
13.     End if
14.     Add arc to List_arcs_covered
15.     Adjust and update dates based on TLs for
      origin or destination nodes
16.     Propagate modifications for arcs connected
      to Destination_node and update Queue
17.   End While
18.   Return true
End
```

3.3 Repair procedure

The repair procedure begins by detecting positive-length cycles in the disjunctive graph caused by the violation of time lag constraints. To restore feasibility, the operations involved in these cycles must be reordered. This is possible by using a combination of leftward swaps (to minimize makespan) and rightward swaps (as a fallback) to eliminate the detected cycles.

The steps are as follows: 1) for a given problematic arc violating TL constraints, we identify a cycle on the disjunctive graph caused by this arc; 2) for each disjunctive arc in the cycle, we apply a swap operation along this arc direction, prioritizing moves to the left; 3) Track attempted swaps using a tabu list to avoid repetitive modifications; 4) if no feasible swap is possible to the left, change the direction of modifications to the right; 5) we repeat the process until all cycles are eliminated or the maximum number of iterations is reached.

Additionally, to ensure that all infeasibilities in the schedule are resolved, the repair process follows a job-order strategy, starting with cycles caused by operations of the first job, then proceeding sequentially to the second job, and so on. This structured repair approach prevents the creation of new infeasibilities during successive iterations, ensuring a progressively feasible schedule.

This repair procedure is guaranteed to successfully eliminate

infeasibilities, making it a powerful method for maintaining the search within the feasible regions of the solution space. Furthermore, a canonical schedule, where all operations of one job are scheduled only after the completion of all operations of another job, always respects all Time-lag constraints in JSPTL, ensuring that every repaired solution remains valid within the problem's constraints.

To visualize the repair procedure, let us consider the JSPTL instance in Table 1 and Table 2. Table 1 outlines the operations for each job, including the assigned machine and processing time, providing a clear representation of resource requirements and sequencing across jobs. Table 2 complements this by presenting the Time-lag constraints, specifying the minimum and maximum delays between consecutive operations within each job.

Table 1. A JSP instance

Job 1	$M_2, p_{1,1} = 8$	$M_1, p_{1,2} = 10$	$M_3, p_{1,3} = 15$
Job 2	$M_1, p_{2,1} = 11$	$M_3, p_{2,2} = 9$	$M_2, p_{2,3} = 12$
Job 3	$M_3, p_{3,1} = 20$	$M_1, p_{3,2} = 13$	$M_2, p_{3,3} = 7$

Table 2. TLs between operations: $\{T^{min}_{O_{i,j},O_{i,j+1}}, T^{max}_{O_{i,j},O_{i,j+1}}\}$

Job 1	$\{2, 11\}$	$\{1, 13\}$
Job 2	$\{0, 10\}$	$\{3, 9\}$
Job 3	$\{4, 13\}$	$\{3, 10\}$

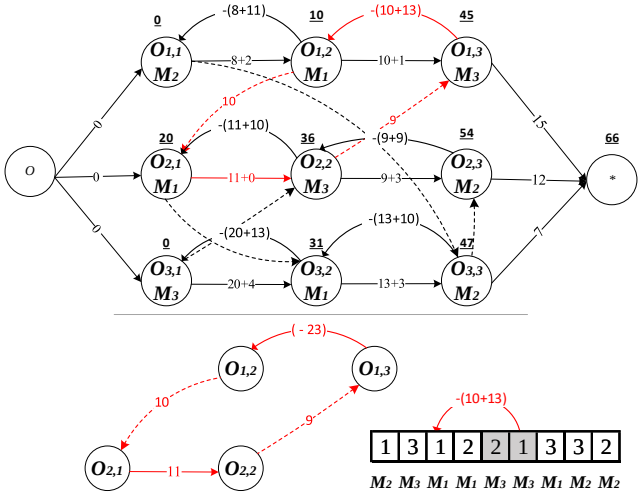


Figure 1. An infeasible solution coding with a positive length cycle

Initially, the Bierwirth vector used for the solution coding is evaluated, and any detected cycles are identified and stored for repair. Figure 1 illustrates the disjunctive graph of an infeasible solution coding $VB = \{1,3,1,2,2,1,3,3,2\}$, in which the cycle is indicated by the red arcs. In this example, the maximum Time-lag constraint between the second and third operations of job 1 is not respected, creating a positive-length cycle: $O_{1,2} \rightarrow O_{2,1} \rightarrow O_{2,2} \rightarrow O_{1,3}$, with a total cycle length of 10+11+9-23 = 7. The cycle, which invalidates the solution, is marked by the red arcs in Figure 1.

For the given example, the problematic arc on the disjunctive graph is between $O_{1,2}$ and $O_{1,3}$. The repair begins with the last operation of the first job, $O_{1,3}$, which violates the maximum Time-lag constraint due to its position in the sequence. Initially, the repair process attempts to move the violating operation to the left in the sequence, aiming to reorder it earlier and correct the violation. If this adjustment fails, the direction is changed to the right, although rightward movements often degrade the quality of the solution and are used only as a last option.

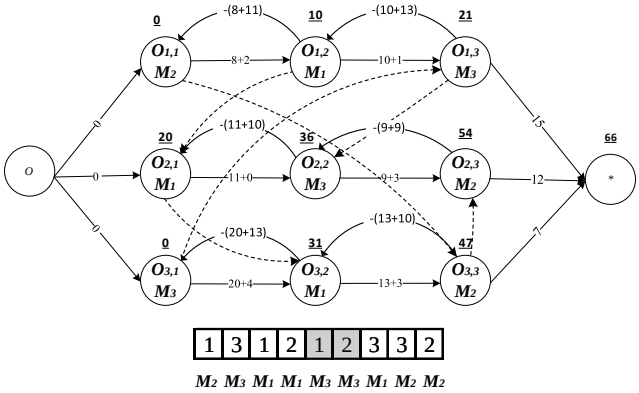


Figure 2. Repaired solution coding with the disjunctive graph

In this case, the predecessor of $O_{1,3}$ in the sequence is $O_{2,2}$, which is processed on the same machine M_3. To repair the sequence, $O_{1,3}$ and $O_{2,2}$ are swapped in the Bierwirth sequence. On machine M_3, the sequence changes as follows:

Before the swap, it was: $O_{3,1}$, $O_{2,2}$then $O_{1,3}$.

After the swap, it becomes: $O_{3,1}$, $O_{1,3}$ then $O_{2,2}$.

Following the swap of two operations on machine 3, the updated Bierwirth vector, shown under the disjunctive graph in Figure 2, is evaluated. If the solution remains infeasible, the iterative process continues by further adjusting the sequence until all violations are corrected and feasibility is achieved. Moreover, a tabu list is employed to avoid redundant moves in each direction (left and right). The repair process terminates when a feasible solution is found and the repaired solution is returned. As shown in Figure 2, the repaired solution achieves a makespan of 66 time units.

4 COMPUTATIONAL EXPERIMENT

The computational experiments were conducted using a PC with an Intel Xeon E-2276M processor (2.8 GHz) under Windows. The proposed algorithm is implemented in Java. The benchmark instances utilized in this study were derived from the JSP Lawrence instances as generated by (Caumond et al., 2008), in which minimum time-lags were set to zero, and the maximum time-lags were calculated by applying a coefficient to the average processing time of each job. This experiment uses instances ‘la01’ to ‘la05’ with coefficient values of 1 and 2, and instances ‘la06’ to ‘la08’ with coefficients of 3 and 10. The ILS parameter was set to 1000 iterations, and 4 executions were made. The best solution is recorded with the time taken to reach it.

Table 3 illustrates the comparative study comparing the performance of the proposed enhanced ILS against the other state-of-the-art methods, including the Memetic Algorithm

(MA) by (Caumond et al., 2008) and the Scatter Search with Path Relinking (SSPR) by (González et al., 2015). In Table 3, LB corresponds to the Lower Bound, '*t(s)*' is the time to the best-found solution in seconds, and the $Gap(\%) = (Cmax - LB)/LB$. For the instances 'la01' to 'la05', the proposed algorithm achieves a GAP of 0.39% on average, which is competitive with SSPR (0.02%). MA has a higher average GAP value of 2.39%. For instances 'la06' to 'la08', the ILS algorithm significantly outperforms MA, which has a high GAP value (7.64%). The proposed ILS achieves an average GAP of 1.23%, demonstrating strong quality even for larger instances. On the other hand, the average computational time for instances 'la01' to 'la05' of the MA method is the highest (128.5 seconds), whereas the proposed ILS method is much faster, averaging 44.05 seconds. SSPR remains the fastest at 5.1 seconds, but ILS offers a good balance between speed and solution quality. For instances 'la06' to 'la08', MA again exhibits substantial computation times (249.33 seconds on average).

Table 3. Results of the computational experiment

Instance	LB	MA (Caumond et al., 2008)		SSPR (Gonzalez et al., 2015)		The proposed approach	
		GAP(%)	*t* (s)	GAP(%)	*t* (s)	GAP (%)	*t* (s)
la01_0_1	683	5.86%	164	**0.00%**	5	**0.00%**	22.3
la01_0_2	666	**0.00%**	86	**0.00%**	4	**0.00%**	39
la02_0_1	686	5.39%	150	**0.00%**	5	**0.00%**	47.2
la02_0_2	673	1.49%	167	**0.00%**	5	0.89%	60
la03_0_1	640	0.16%	206	**0.00%**	7	**0.00%**	34
la03_0_2	630	2.86%	150	0.16%	5	1.43%	60
la04_0_1	646	2.48%	151	**0.00%**	7	1.08%	60
la04_0_2	619	1.94%	83	**0.00%**	4	0.48%	54
la05_0_1	593	3.71%	92	**0.00%**	5	**0.00%**	49
la05_0_2	593	**0.00%**	36	**0.00%**	4	**0.00%**	15
Avg.		2.39%	128.5	0.02%	5.1	0.39%	44.05
la06_0_3	926	18.90%	405	**0.00%**	7	**0.00%**	244
la06_0_10	926	**0.00%**	14	**0.00%**	4	**0.00%**	0
la07_0_3	890	9.55%	477	**0.00%**	6	4.95%	300
la07_0_10	890	**0.00%**	39	**0.00%**	6	2.42%	1
la08_0_3	863	17.38%	544	**0.00%**	6	**0.00%**	107
la08_0_10	863	**0.00%**	17	**0.00%**	5	**0.00%**	2
Avg.		7.64%	249.33	0.00%	5.67	1.23%	109

While the proposed ILS algorithm performs better than the Memetic Algorithm, it remains less efficient than the SSPR proposed by (González et al., 2015). This difference in the performance is due to the difference in the solution space exploration strategy of each method: the SSPR explores both feasible and infeasible regions of the solution space with a penalty function, which allows more diversification. In contrast, our approach explores only the feasible regions of the solution space through real-time repair of solutions. This strategy guarantees feasibility at all stages, which may be critical in industrial applications where infeasible schedules are unacceptable. The proposed algorithm gives a very competitive performance in terms of solution quality. Meanwhile, our approach is designed to complete all iterations without defining the lower bound to be reached. While the most efficient existing algorithms stop when the lower bound is found, that makes CPU time of our approach quite long but more realistic in real application case.

5 Conclusion & perspectives

This paper has presented an Iterated Local Search (ILS) with a novel repair procedure to address the JSPTL. The repair procedure allows transforming an infeasible solution coding into a feasible one. It allows the proposed ILS work with feasible solution coding without using relaxation techniques. The result demonstrates the ability of the proposed algorithm to produce high-quality and feasible schedules on benchmark JSPTL instances, achieving competitive results in both solution quality and computational efficiency compared to the state-of-the-art methods.

Future work will explore the development of a hybrid metaheuristic that combines the strengths of the current repair procedure with additional optimization techniques to enhance performance further. We also aim to extend the approach to tackle the JSP with generic time-lags or the Flexible Job Shop scheduling problem with generic time-lags. These extensions will enable the approach to handle a broader range of complex scheduling scenarios, making it even more relevant for industrial applications where flexibility and time-sensitive scheduling are crucial.

6 References

Artigues, C., Huguet, M. J., & Lopez, P. (2011). Generalized disjunctive constraint propagation for solving the job shop problem with Time-lags. *Engineering Applications of Artificial Intelligence, 24(2)*, 220-231.

Bierwirth, C. (1995). A generalized permutation approach to job shop scheduling with genetic algorithms. *Operations-Research-Spektrum, 17(2)*, 87-92.

Brucker, P., Hilbig, T., & Hurink, J. (1999). A branch and bound algorithm for a single-machine scheduling problem with positive and negative time-lags. *Discrete applied mathematics, 94(1-3)*, 77-99.

Caumond, A., Lacomme, P., & Tchernev, N. (2008). A memetic algorithm for the job-shop with time-lags. *Computers & Operations Research, 35(7)*, 2331-2356.

Fondrevelle, J., Oulamara, A., & Portmann, M. C. (2006). Permutation flowshop scheduling problems with maximal and minimal Time-lags. *Computers & Operations Research, 33(6)*, 1540-1556.

González, M. A., Oddi, A., Rasconi, R., & Varela, R. (2015). Scatter search with path relinking for the job shop with Time-lags and setup times. *Computers & Operations Research, 60*, 37-54.

Harrabi, M., Driss, O. B., & Ghedira, K. (2021). A hybrid evolutionary approach to job-shop scheduling with generic Time-lags. *Journal of Scheduling, 24(3)*, 329-346.

Hurink, J., & Keuchel, J. (2001). Local search algorithms for a single-machine scheduling problem with positive and negative time-lags. *Discrete Applied Mathematics, 112(1-3)*, 179-197.

Lacomme, P., Tchernev, N., & Huguet, M. J. (2011, September). Dedicated constraint propagation for Job-Shop problem with generic time-lags. *In ETFA2011 (pp. 1-7)*. IEEE.

Lourenço, H. R., Martin, O. C., & Stützle, T. (2019). Iterated local search: Framework and applications. *Handbook of metaheuristics*, 129-168.

Neumann, K., Schwindt, C., & Zimmermann, J. (2002). Project scheduling with time windows and scarce resources: temporal and resource-constrained project scheduling with regular and non-regular objective functions *(Vol. 508). Berlin*: Springer.

Roy, B., & Sussmann, B. (1964). Les problemes d'ordonnancement avec contraintes disjonctives. *Note ds*, 9.

Wikum, E.D., Llewellyn, D., Nemhauser, G., 1994. One-machine generalized precedence constrained scheduling problems. *Oper. Res. Lett. 16*, 87–99.

CIGI QUALITA MOSIM 2025

Équilibrage des lignes de désassemblage avec collaboration homme-robot : approche hybride d'optimisation bi-objectif

OUMAYMA LAOUINI[1], ILHEM SLAMA[2], FAICEL HNAIEN[1], ZIED JEMAI[2]

[1] Université de Technologie de Troyes, LIST3N
12 rue Marie Curie, 10000 Troyes, France
{oumayma.laouini, faicel.hnaien}@utt.fr

[2] CentraleSupélec, Laboratoire Genie Industriel, Université Paris-Saclay
3 rue Joliot-Curie, 91190 Gif-sur-Yvette, Île-de-France, France
{ilhem.slama, zied.jemai}@centralesupelec.fr

Résumé – Avec la diminution des cycles de vie des produits, le nombre de produits en fin de vie ne cesse d'augmenter, rendant le désassemblage un processus crucial pour le recyclage et la réutilisation des composants. Traditionnellement, le désassemblage est effectué soit manuellement par des opérateurs humains, soit de manière entièrement automatique par des robots. Cependant, certaines tâches complexes nécessitent l'intervention humaine, ce qui souligne la nécessité d'une collaboration homme-robot dans les systèmes de désassemblage. Dans ce travail, nous abordons le problème d'équilibrage des lignes de désassemblage en tenant compte de cette collaboration. Nous proposons une approche d'optimisation bi-objectif visant à minimiser le coût total et le temps d'inactivité. Le problème est modélisé sous forme d'un Programme Linéaire en Nombres Entiers Mixtes (MILP) et résolu à l'aide d'une approche hybride combinant l'algorithme NSGA-II et une recherche locale adaptée aux spécificités du problème. La méthode est appliquée aux graphes de priorité des tâches de désassemblage de produits réels, et les fronts de Pareto obtenus par l'algorithme hybride NSGA-II sont comparés à ceux de la méthode exacte ε-contrainte. Les résultats démontrent que l'algorithme hybride génère efficacement des fronts de Pareto optimaux pour les instances de petite et moyenne taille, tout en réduisant de manière significative le temps de calcul pour les instances complexes.

Mots clés **- Équilibrage des lignes de désassemblage, Collaboration homme-robot, Optimisation bi-objectif, NSGA-II.**

Abstract – As product lifecycles shorten, the volume of end-of-life products increases, making disassembly a crucial process for the recycling and reuse of components. Traditionally, disassembly has been carried out either manually by human operators, or fully automatically by robots. However, some complex tasks require human intervention, highlighting the need for human-robot collaboration in disassembly systems. In this paper, we address the disassembly line balancing problem with human-robot collaboration, using a bi-objective optimization approach that minimizes total cost and idle times. The problem is formulated as a mixed integer linear program (MILP) and solved with a hybrid approach combining the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) and a local search, adapted to the specific characteristics of the problem. The method is applied to real-world task priority graphs from real products, and the Pareto fronts obtained by the hybrid NSGA-II are compared with those of the exact ε-constraint method. Results demonstrate that the hybrid algorithm efficiently generates optimal Pareto fronts for small and medium-sized instances, while significantly reducing computation time for larger instances.

Keywords **– Disassembly line balancing, Human-robot collaboration, Bi-objective optimization, NSGA-II.**

CIGI QUALITA MOSIM 2025

Optimisation de la collecte des déchets recyclables dans les pays à faible et moyen revenu

DIANA A. PEÑA[1,2,3], LIONEL AMODEO[2], JAIRO R. MONTOYA-TORRES[1]

[1] FACULTAD DE INGENIERIA, UNIVERSIDAD DE LA SABANA
Km 7 Autopista Norte De Bogotá, D.C, Chía, Cundinamarca, Colombia
dianapenca@unisabana.edu.co; jairo.montoya@unisabana.edu.co

[2] COMPUTER SCIENCES AND DIGITAL SOCIETY LABORATORY (LIST3N), UNIVERSITY OF TECHNOLOGY OF TROYES(UTT)
12 Rue Marie Curie, Troyes Cedex, 10004, France
diana.pena@utt.fr; lionel.amodeo@utt.fr

[3] UNIVERSIDAD ICESI
Calle 18 No. 122-135, Cali, Colombia
dapena@icesi.edu.co

***Résumé* – La collecte des déchets est une phase clé de la logistique inverse. Chaque pays doit relever le défi d'implanter des solutions efficaces, à la fois économiques et durables sur le plan environnemental, sans compromettre la qualité de vie. Il est donc essentiel de concevoir un système optimisé pour le transport et le traitement des déchets. Dans les pays à faible et moyen revenu, ce défi est plus complexe que dans les pays à revenu élevé, car les systèmes de gestion des déchets sont souvent insuffisants, nécessitant des méthodes alternatives et favorisant la croissance du secteur informel. Cette recherche intègre les dimensions économiques, environnementales et sociales de la gestion des déchets, en tenant compte de l'informalité des associations de récupérateurs dans le processus d'optimisation des itinéraires. Nous analysons un problème de routage à deux niveaux (2E-WCVRP) et proposons un modèle mathématique visant à maximiser les profits des récupérateurs tout en minimisant les coûts des camions collectant les déchets déposés dans des sites intermédiaires. Pour résoudre ce problème, nous développons une approche basée sur une métaheuristique efficace, testée sur des instances de la littérature et un cas d'étude en Colombie.**

***Keywords* – waste collection, waste pickers, sustainability, routing.**

***Abstract* – Waste collection phase is a critical in reverse logistics. The challenge faced by every country in the world in terms of waste collection is to implement effective solutions that are both economically and environmentally sustainable, without compromising the quality of life of the population. Therefore, it is essential to develop an efficient system for the transport and handling of disposed waste. In low- and middle-income countries, the challenge is greater than in high-income countries, as waste management systems often operate below standard, requiring alternative methods of waste handling and encouraging the growth of an informal waste sector. This research integrates the economic, environmental, and social aspects of waste management while considering the informality of waste pickers' associations in the routing process. Specifically, we analyze a two-echelon vehicle routing problem (2E-WCVRP) and propose a mathematical model that aims to maximize waste pickers' profits while minimizing the costs for trucks that collect waste deposited at satellite locations. To solve this problem, we develop an efficient metaheuristic-based approach. The proposed resolution method is tested on benchmark instances from the literature as well as a case study in Colombia.**

Mots clés - collecte des déchets, collecteurs de déchets, durabilité, routage.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Modèles de gouvernance de la gestion des matières résiduelles en économie circulaire : Un outil d'aide à la décision pour les administrations publiques locales

FLORENCE BLOUIN[1], JEAN-FRANÇOIS AUDY[1], LAMIA BERRAH[2]

[1] UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES
Trois-Rivières, QC, G8Z 4M3, Canada
florence.blouin@uqtr.ca
jean-francois.audy@uqtr.ca

[2] UNIVERSITÉ SAVOIE MONT BLANC
Annecy, 74944, France
lamia.berrah@univ-smb.fr

***Résumé* – L'économie circulaire constitue une solution durable au défi croissant de la gestion des matières résiduelles générées ou prises en charge par les administrations publiques locales dans le cadre des services publics. En effet, la recirculation de ces matières résiduelles peut permettre aux administrations publiques locales de générer des bénéfices à la fois financiers, environnementaux et sociétaux. Alors que la transition vers une chaîne d'approvisionnement circulaire implique des changements fondamentaux dans les pratiques et les relations interorganisationnelles pour coordonner les multiples parties prenantes, un modèle de gouvernance doit être mis en œuvre. Toutefois, selon les parties prenantes impliquées et la distribution des responsabilités de la gestion des matières résiduelles, différents modèles de gouvernance peuvent être envisagés. Par conséquent, la contribution de cette étude est un outil d'aide à décision destiné aux administrations publiques locales. Cet outil, fondé sur une grille d'évaluation, inclut i) la conceptualisation de cinq modèles de gouvernance potentiels, ii) la définition de douze critères de performance et iii) l'identification de trois conditions particulières, permettant de sélectionner le modèle de gouvernance de la gestion des matières résiduelles des administrations publiques locales le plus approprié dans une chaîne d'approvisionnement circulaire.**

***Abstract* – The circular economy offers a sustainable solution to the growing challenge of managing residual materials generated or handled by local governments as part of public services. Indeed, recirculating these residual materials can enable local governments to generate financial, environmental, and societal benefits. As the transition towards a circular supply chain involves fundamental changes in practices and interorganizational relationships to coordinate multiple stakeholders, a governance model must be implemented. However, depending on the stakeholders involved and the distribution of responsibilities in the management of residual materials, different governance models can be considered. Therefore, the contribution of this study is a decision support tool intended for local governments. This tool, based on an evaluation grid, includes i) the conceptualization of five potential governance models, ii) the definition of twelve performance criteria, and iii) the identification of three specific conditions, enabling the selection of the most appropriate governance model for local governments' residual materials management in a circular supply chain.**

***Mots clés* – Économie circulaire, Modèle de gouvernance, Administration publique locale, Aide à la décision, Gestion des matières résiduelles.**

***Keywords* – Circular economy, Governance model, Local government, Decision support, Residual materials management.**

1 INTRODUCTION

L'augmentation des matières résiduelles, en raison de la croissance démographique urbaine mondiale, exerce une pression sur les administrations publiques locales (entités ou organisations gouvernementales responsables des affaires publiques des collectivités territoriales locales), qui doivent gérer ces matières de manière efficace et durable [Christensen, 2021]. Les matières résiduelles des administrations publiques locales sont générées ou prises en charge dans le cadre des services publics visant à répondre aux besoins collectifs des citoyens. Ces matières résiduelles comprennent un inventaire de diverses catégories (résidus ménagers, boues d'épuration, débris de rénovation de voirie, balayures de rue, etc.), chacune nécessitant une gestion spécifique [Recyc-Québec, 2022]. De surcroît, les chaînes d'approvisionnement linéaires (extraire – utiliser – jeter), prévalentes dans les sociétés modernes, entraînent une rareté des ressources qui ne cesse de s'intensifier [Merli et al., 2018]. Pour répondre à ces défis contemporains liés à la surconsommation et au gaspillage des ressources, il est impératif que les administrations publiques locales mettent en place des systèmes de gestion de leurs matières résiduelles fondés, en l'occurrence, sur les principes de l'économie circulaire [Li, 2021]. L'économie circulaire représente un nouveau système économique conçu pour

atteindre des objectifs de développement durable [Saidani et al., 2019]. Les chaînes d'approvisionnement circulaires maximisent l'utilisation des ressources et réduisent la production de déchets, générant des bénéfices à la fois financiers, environnementaux et sociétaux [Kristensen et Mosgaard, 2020 ; Werning et Spinler, 2020]. La Figure 1 illustre une chaîne d'approvisionnement circulaire pour la gestion des matières résiduelles des administrations publiques locales, en comparaison à une chaîne d'approvisionnement linéaire. Dans le cadre des services publics, les responsabilités liées à la gestion des matières résiduelles des administrations publiques locales incluent généralement le processus de collecte, de traitement et de recirculation ou de disposition de ces matières.

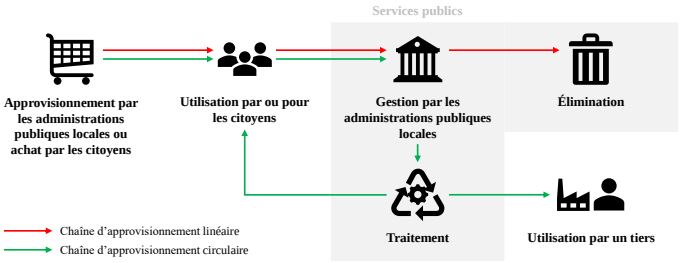


Figure 1. Chaîne d'approvisionnement circulaire pour la gestion des matières résiduelles des administrations publiques locales en comparaison à une chaîne d'approvisionnement linéaire

La transition de l'économie linéaire vers l'économie circulaire requiert des changements fondamentaux au niveau des pratiques et des relations interorganisationnelles [Sudusinghe et Seuring, 2022]. En effet, les chaînes d'approvisionnement circulaires sont des systèmes complexes en raison, d'une part, de la coordination nécessaire entre de multiples parties prenantes (administrations publiques locales, entreprises privées, organismes publics, organisations à but non lucratif, citoyens, etc.) et, d'autre part, de la diversité des rôles et des objectifs qui leur sont attribués [Guzman et De Souza, 2018]. Cette complexité impose une transformation des modèles de gouvernance, ceux-ci désignant des structures organisationnelles qui coordonnent les parties prenantes à travers des mécanismes (contrats, technologies de l'information, partage d'information et prise de décision conjointe), afin de définir au mieux leurs responsabilités dans la gestion des matières résiduelles [Aitken et Harrison, 2013 ; Bulkeley et al., 2007 ; Ghosh et Fedorowicz, 2008 ; Patterson et al., 2017 ; van Veen-Dirks et Verdaasdonk, 2009].

Toutefois, selon le contexte de mise en œuvre de l'économie circulaire, différents modèles de gouvernance peuvent être adoptés [Minoja et Romano, 2024], dont les caractéristiques varient notamment en fonction des parties prenantes impliquées et de la distribution des responsabilités. La notion de responsabilité fait référence à la nécessité d'exercer des pouvoirs décisionnels et à en assumer les conséquences. Alors qu'il s'agit d'un sujet de recherche émergent, les modèles de gouvernance pour soutenir les administrations publiques locales dans la mise en œuvre de chaînes d'approvisionnement circulaires sont peu étudiés dans la littérature [Bugge et al., 2019 ; Christensen, 2021]. Des recherches supplémentaires sont donc essentielles pour conceptualiser des modèles de gouvernance potentiels, en particulier pour la gestion des matières résiduelles générées ou prises en charge dans le cadre des services publics dans un contexte d'économie circulaire. De plus, il n'existe actuellement aucun outil permettant aux administrations publiques locales de prendre des décisions éclairées en s'appuyant sur des critères pour prioriser le modèle de gouvernance le plus approprié aux spécificités de leur chaîne d'approvisionnement circulaire.

Ainsi, le but de cette étude est de renforcer la mise en œuvre de chaînes d'approvisionnement circulaires pérennes en répondant à la question de recherche suivante : *Quel modèle de gouvernance une administration publique locale doit-elle mettre en œuvre pour la gestion des matières résiduelles dans une chaîne d'approvisionnement circulaire?* La contribution est un outil d'aide à la décision fondé sur une grille d'évaluation, incluant i) la conceptualisation de cinq modèles de gouvernance potentiels, ii) la définition de douze critères de performance et iii) l'identification de trois conditions particulières, permettant aux administrations publiques locales de sélectionner le modèle de gouvernance le plus approprié.

La suite de cet article est structurée comme suit. La section 2 présente la revue de la littérature sur la gouvernance de la gestion des matières résiduelles dans un contexte d'économie circulaire, en se concentrant particulièrement sur les modèles de gouvernance pouvant soutenir les administrations publiques locales. La section 3 propose l'outil d'aide à la décision pour la sélection d'un modèle de gouvernance de la gestion des matières résiduelles des administrations publiques locales dans les chaînes d'approvisionnement circulaires. La section 4 discute des résultats potentiels de l'outil par le biais d'analyses de sensibilité. Finalement, la section 5 conclut et indique les travaux futurs envisagés pour compléter la proposition.

2 REVUE DE LA LITTERATURE

Cette section présente d'abord l'état de l'art général sur la gouvernance de la gestion des matières résiduelles dans un contexte d'économie circulaire. Ensuite, elle examine spécifiquement la littérature sur la gouvernance de la gestion des matières résiduelles des administrations publiques locales dans les chaînes d'approvisionnement circulaires, en mettant l'accent sur les modèles de gouvernance et leurs caractéristiques. Cette revue permet également de mettre en évidence les principales lacunes dans la littérature.

2.1 Gouvernance de la gestion des matières résiduelles en économie circulaire

En raison de la croissance de la transition vers l'économie circulaire, qui implique des changements dans les mécanismes de coordination des parties prenantes, plusieurs études ont commencé à explorer la gouvernance de la gestion des matières résiduelles dans des chaînes d'approvisionnement circulaires. Le Tableau 1 présente, par ordre alphabétique, les principaux articles traitant de la gouvernance de la gestion des matières résiduelles dans un contexte d'économie circulaire ainsi que l'objet de leur recherche.

Tableau 1. Articles traitant de la gouvernance de la gestion des matières résiduelles en contexte d'économie circulaire

Article	Objet de l'étude
Aitken et Harrison [2013]	Analyse des changements dans les modèles de gouvernance qui évoluent avec la transition vers des chaînes d'approvisionnement circulaires
Arfaoui et al. [2022]	Comparaison des arrangements de gouvernance au niveau micro favorisant l'économie circulaire
Bugge et al. [2019]	Étude de l'influence de trois modèles de gouvernance sur la capacité des autorités locales à effectuer une transition vers une économie circulaire pour la gestion des matières résiduelles urbaines
Cramer [2022]	Définition d'un cadre théorique pour comparer la gouvernance de l'économie circulaire à l'échelle internationale

Christensen [2021]	Analyse de quatre modèles de gouvernance soutenant les administrations publiques locales dans leur transition vers une économie circulaire
Guzman et De Souza [2018]	Détermination des pratiques organisationnelles essentielles pour la transition vers des modèles de gouvernance dédiés à la recirculation des matières résiduelles en économie circulaire
Maaß et Grundmann [2018]	Exploration des modèles de gouvernance permettant de coordonner les transactions et les interdépendances entre les parties prenantes de chaînes de valeur circulaires
Minoja et Romano [2024]	Analyse de l'influence de trois modèles de gouvernance sur la motivation des parties prenantes à coopérer dans la transition vers une économie circulaire
Obersteg et al. [2019]	Identification des défis de gouvernance freinant la transition vers une économie circulaire à l'échelle régionale
Patala et al. [2022]	Développement d'une théorie de gouvernance polycentrique pour les matières résiduelles privées dans des systèmes d'économie circulaire
Pollans [2017]	Identification des obstacles à la transition vers des modèles de gouvernance de la gestion des matières résiduelles en économie circulaire à l'échelle locale
Pratt [2022]	Détermination des ajustements potentiels nécessaires dans les modèles de gouvernance lors de la transition vers une économie circulaire
Schultz et al. [2024]	Identification de trois modèles de gouvernance pour la collaboration entre parties prenantes en économie circulaire

Les articles recensés offrent des perspectives sur la manière dont la gouvernance influence l'efficacité et la pérennité de la gestion des matières résiduelles dans une chaîne d'approvisionnement circulaire. À travers des cas d'application dans des secteurs variés, ils soulignent les changements nécessaires dans les pratiques interorganisationnelles pour surmonter les défis et les obstacles de la gouvernance lors de la transition vers une économie circulaire, tout en présentant les caractéristiques de modèles de gouvernance à divers niveaux institutionnels. Cependant, ces articles révèlent également une lacune, soit l'absence d'études portant sur la manière dont les administrations publiques locales peuvent choisir parmi différentes options de modèles de gouvernance de la gestion des matières résiduelles générées ou prises en charge dans le cadre des services publics dans les chaînes d'approvisionnement circulaires.

2.2 Gouvernance de la gestion des matières résiduelles des administrations publiques locales en économie circulaire

La gouvernance de la gestion des matières résiduelles englobe quatre niveaux institutionnels auxquels sont attribués différents rôles et responsabilités [Antonioli et Massarutto, 2012 ; Bulkeley et al., 2005] :

- **International :** Établissement de conditions-cadres pour les politiques et les réglementations nationales, régionales et locales de gestion des matières résiduelles.
- **National :** Développement de politiques économiques, techniques et environnementales avec supervision des processus de planification de gestion des matières résiduelles.
- **Régional :** Élaboration de réglementations pour encadrer la planification de la capacité d'élimination, l'autorisation des installations et la supervision des pratiques de gestion des matières résiduelles.
- **Local :** Organisation des activités de gestion des matières résiduelles en conformité avec les réglementations établies.

Cette étude se concentre sur le niveau de gouvernance locale de la gestion des matières résiduelles. Les administrations publiques locales sont souvent positionnées à la fin des flux linéaires de matières dans le cadre des services publics (cf. Figure 1), les rendant responsables de la gestion des matières résiduelles avec des objectifs de durabilité à atteindre [Pollans, 2017]. De ce fait, elles jouent un rôle crucial dans la mise en œuvre de chaînes d'approvisionnement circulaires, en plus d'être des facilitateurs de la coordination des parties prenantes [Christensen, 2021].

2.2.1 Modèles de gouvernance pour les administrations publiques locales en économie circulaire

La gestion efficace et pérenne des matières résiduelles des administrations publiques locales dans une chaîne d'approvisionnement circulaire nécessite la mise en œuvre d'un modèle de gouvernance. Dans la littérature examinée, seulement deux études ont proposé des modèles de gouvernance soutenant les administrations publiques locales pour la gestion des matières résiduelles dans une chaîne d'approvisionnement circulaire. Le Tableau 2 présente une synthèse de ces travaux par une description des modèles de gouvernances proposés, mettant en évidence la diversité des approches.

Tableau 2. Modèles de gouvernance des administrations publiques locales pour la gestion des matières résiduelles en économie circulaire proposés dans la littérature

Modèle de gouvernance		Article
Bureaucratie traditionnelle	L'administration publique locale contrôle et réalise la plupart des activités liées à la gestion des matières résiduelles en interne	Bugge et al., [2019]
Nouvelle gestion publique	L'administration publique locale sous-traite plusieurs activités liées à la gestion des matières résiduelles à des entreprises privées par le biais d'appels d'offres spécifiques.	
Gouvernance en réseau	L'administration publique locale facilite et orchestre les interactions et les synergies entre les parties prenantes des secteurs public et privé impliquées dans la gestion des matières résiduelles	
Autogouvernance	L'administration publique locale gère ses propres actifs et activités liés à la gestion des matières résiduelles	Christensen [2021]
Gouvernance par la prestation	L'administration publique locale fournit des services et des ressources pour la gestion des matières résiduelles par l'intermédiaire d'agences publiques	
Gouvernance par l'autorité	L'administration publique locale utilise la réglementation pour faire appliquer la gestion des matières résiduelles	
Gouvernance par l'habilitation	L'administration publique locale coordonne et facilite la collaboration et les partenariats pour la gestion des matières résiduelles	

2.2.2 Caractéristiques des modèles de gouvernance des administrations publiques locales en économie circulaire

Les modèles de gouvernance de la gestion des matières résiduelles des administrations publiques locales se distinguent par diverses caractéristiques. Certains auteurs ont identifié des caractéristiques des modèles de gouvernance dans un contexte d'économie circulaire, parmi lesquelles celles permettant une appréciation qualitative de leurs impacts ont été retenues :

- **Réflexivité :** Capacité d'amélioration continue du modèle de gouvernance [Bugge et al., 2019].
- **Contrôle :** Capacité de l'administration publique locale à prendre les décisions concernant la gestion de la chaîne d'approvisionnement circulaire [Korhonen et al, 2018 ; Minoja et Romano, 2024].

- **Coût d'opération :** Coût financier total associé à la mise en œuvre et à l'exploitation du modèle de gouvernance [Minoja et Romano, 2024].
- **Répartition des risques :** Capacité à répartir les risques entre les parties prenantes pour minimiser les impacts négatifs sur l'administration publique locale [Korhonen et al, 2018].
- **Transparence :** Disponibilité et accessibilité des informations pertinentes pour les parties prenantes et les citoyens [Arfaoui et al., 2022].
- **Inclusion :** Capacité à intégrer les parties prenantes et les citoyens dans la prise de décision [Arfaoui et al., 2022].

Les caractéristiques de comparaison qualitatives proposées par ces auteurs peuvent orienter la détermination de critères de performance permettant la sélection du modèle de gouvernance le plus approprié selon la chaîne d'approvisionnement circulaire.

2.3 Analyse de la littérature

La revue de la littérature présentée ci-dessus met en lumière que la transition vers l'économie circulaire peut nécessiter une adaptation des modèles de gouvernance traditionnellement alignés sur les principes de l'économie linéaire. La modification des pratiques interorganisationnelles est essentielle pour la réussite de la mise en œuvre de modèles de gouvernance pour la recirculation des matières résiduelles. Cependant, peu d'études se sont penchées sur la gouvernance de la gestion des matières résiduelles dans un contexte d'économie circulaire en général et encore moins concernant la gestion des matières résiduelles par les administrations publiques locales. Seulement deux études ont proposé des modèles de gouvernance potentiels supportant spécifiquement les administrations publiques locales, malgré leur rôle crucial dans l'accélération de la transition vers l'économie circulaire. De plus, certaines études ont suggéré des caractéristiques d'analyse qualitative des modèles de gouvernance, offrant une vue d'ensemble des différentes options, sans toutefois permettre d'identifier le modèle le plus approprié.

Il est donc essentiel de synthétiser les modèles de gouvernance potentiels de la gestion des matières résiduelles des administrations publiques locales et de développer un outil de comparaison basé sur des critères d'évaluation de leur performance, afin d'identifier celui qui répond le mieux aux spécificités de la chaîne d'approvisionnement circulaire considérée. Cette étude comble cette lacune en proposant un outil d'aide à la décision destiné aux administrations publiques locales pour la sélection d'un modèle de gouvernance de la gestion des matières résiduelles générées ou prises en charge dans le cadre des services publics dans un contexte d'économie circulaire, selon des critères de performance. Il s'agit de la première tentative d'intégration de modèles de gouvernance et de critères dans une logique décisionnelle, visant à renforcer la mise en œuvre de chaînes d'approvisionnement circulaires pérennes.

3 OUTIL D'AIDE A LA DECISION

Cette section détaille l'outil d'aide à la décision pour la sélection d'un modèle de gouvernance de la gestion des matières résiduelles des administrations publiques locales dans les chaînes d'approvisionnement circulaires (Figure 2). L'outil, fondé sur une grille d'évaluation, nécessite une méthodologie tant pour sa conception que pour son utilisation. Les sous-sections 3.1, 3.2 et 3.3 décrivent les étapes de conception de l'outil, soit respectivement l'identification des modèles de gouvernance, la définition de critères de performance et la construction de la grille d'évaluation. Les sous-sections 3.4 et 3.5 portent sur les étapes d'utilisation de l'outil, soit respectivement la présélection d'un modèle de gouvernance et la considération de conditions particulières.

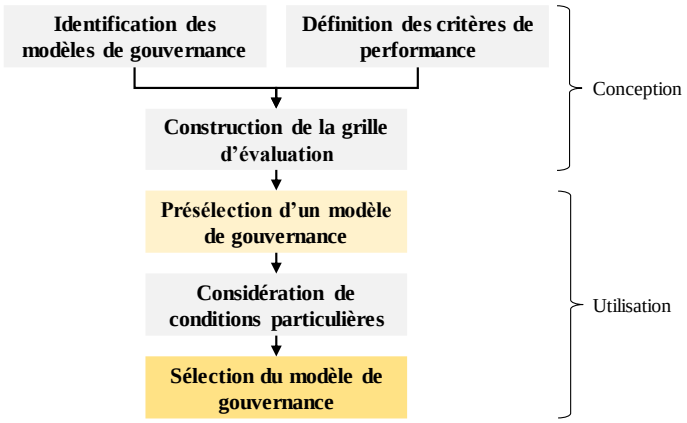


Figure 2. Outil d'aide à la décision pour la sélection d'un modèle de gouvernance de la gestion des matières résiduelles des administrations publiques locales dans les chaînes d'approvisionnement circulaires

3.1 Identification des modèles de gouvernance

La première étape de conception de l'outil consiste à identifier les modèles de gouvernances potentiels de la gestion des matières résiduelles des administrations publiques locales dans une chaîne d'approvisionnement circulaire. À cet effet, le Tableau 3 présente une comparaison des modèles de gouvernance identifiés dans la littérature (cf. Tableau 2), effectuée afin de proposer des modèles en se basant sur les caractéristiques suivantes :

- La forme de répartition des responsabilités de l'administration publique locale dans la gestion des matières résiduelles, à savoir : conserver, transférer, partager, consolider ou imposer.
- L'entité ou les entités responsables de l'exécution de la gestion des matières résiduelles, à savoir l'administration publique locale, un ou des prestataires de services, une ou des parties prenantes et/ou une nouvelle organisation partenaire.

Tableau 3. Comparaison des caractéristiques des modèles de gouvernance

Caractéristique		**Modèle de gouvernance**	
Forme de répartition des responsabilités	Entité(s) responsable(s) de l'exécution	Identifié dans la littérature (cf. Tableau 2)	Proposé dans cette étude
Conserver	Administration publique locale	• Bureaucratie traditionnelle • Autogouvernance	Gouvernance publique interne
Conserver	Administration publique locale et prestataire(s) de services	• Nouvelle gestion publique	Gouvernance publique contractuelle
Transférer	Prestataire(s) de services	• –	Gouvernance déléguée
Partager	Administration publique locale et partie(s) prenantes(s)	• Gouvernance en réseau • Gouvernance par l'habilitation	Gouvernance collaborative
Consolider	Nouvelle organisation partenaire	• Gouvernance par la prestation	Gouvernance collective
Imposer	Partie(s) prenante(s)	• Gouvernance par l'autorité	Gouvernance coercitive

Les modèles de gouvernance identifiés dans la littérature, dont les caractéristiques considérées sont identiques, sont jugés

équivalents. Ces modèles ont été regroupés sous une nouvelle formulation simplifiée, constituant ainsi une contribution en offrant une compréhension claire et accessible des modèles de gouvernance potentiels. Le modèle de gouvernance déléguée a été inclus dans cette étude afin de combler une lacune dans la littérature, en proposant une option supplémentaire pour les administrations publiques locales souhaitant transférer les responsabilités de gestion des matières résiduelles à des prestataires de services. En revanche, le modèle de gouvernance coercitive a été exclu des modèles potentiels considérés dans cette étude, car les matières résiduelles étant générées ou prises en charge par les administrations publiques locales dans le cadre des services publics, ces derniers ne peuvent en imposer les responsabilités de la gestion à d'autres parties prenantes.

Par conséquent, cette étude propose cinq modèles de gouvernance que les administrations publiques locales peuvent envisager d'adopter en fonction de la distribution des responsabilités de la gestion des matières résiduelles. Les modèles de gouvernance sont présentés et décrits à la Figure 3.

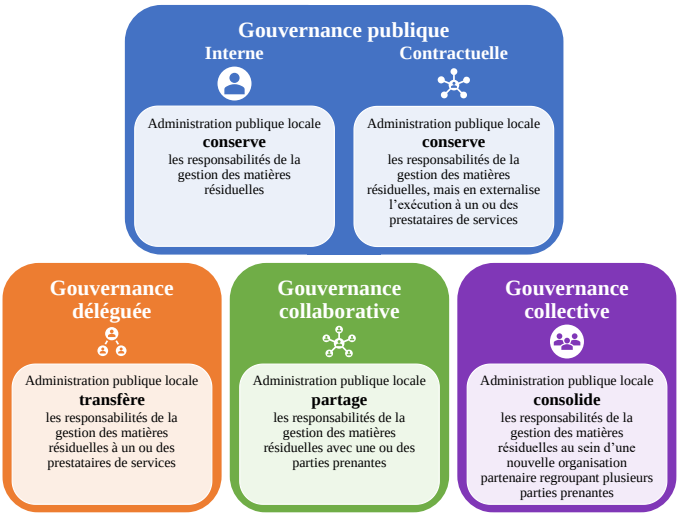


Figure 3. Modèles de gouvernance de la gestion des matières résiduelles des administrations publiques locales dans les chaînes d'approvisionnement circulaires

Afin d'approfondir la description des modèles de gouvernance, le Tableau 4 présente un sommaire des avantages (+) et des inconvénients (–), le cas échéant, de chacun des modèles en fonction des caractéristiques issues de la littérature (cf. section 2.2.2).

Tableau 4. Avantages et inconvénients des modèles de gouvernance

Modèle de gouvernance	Caractéristique					
	Réflex.	Contr.	Coût	Risque	Transp.	Incl.
Publique int.		+			+	
Publique cont.	–	+	+	–		
Déléguée	–	–	–	+	–	–
Collaborative	+					+
Collective	+		–	+		+

3.2 Définition des critères de performance

La deuxième étape de conception de l'outil consiste à définir les critères de performance pour l'évaluation des modèles de gouvernance de la gestion des matières résiduelles des administrations publiques locales dans un contexte d'économie circulaire. Un critère est considéré comme un élément de référence commun permettant d'évaluer individuellement et de comparer l'adéquation de différents modèles de gouvernance dans une chaîne d'approvisionnement circulaire. Cette étude propose une liste de douze critères préliminaires, classés en trois catégories : stratégique, financier et social, présentée dans le Tableau 5. La détermination de ces critères résulte d'une approche sélective, basée sur la littérature [Arfaoui et al., 2022 ; Korhonen et al., 2018 ; Minoja et Romano, 2024] et d'échanges avec des experts en administration publique, visant à identifier les principaux éléments pouvant influencer le choix du modèle de gouvernance dans une chaîne d'approvisionnement circulaire. Seuls les critères génériques et discriminants ont été retenus, c'est-à-dire ceux permettant de distinguer les modèles de gouvernance indépendamment des cas d'application de chaînes d'approvisionnement circulaires.

Tableau 5. Critères de performance préliminaires des modèles de gouvernance

Critère		Description
Stratégique	Viabilité à long terme	Niveau de stabilité temporelle requis pour la chaîne d'approvisionnement circulaire
	Volonté de contrôle	Niveau d'influence désiré sur les décisions stratégiques, les processus opérationnels, les résultats et/ou l'image publique
	Compatibilité avec l'activité principale	Niveau d'alignement de la chaîne d'approvisionnement circulaire avec la mission, la vision et les valeurs de l'administration publique locale
	Contribution significative de tiers	Niveau d'expertise et/ou d'investissement requis de la part de tiers autres que l'administration publique locale
Financier	Rentabilité financière	Niveau de rendement financier net proportionnel généré par la chaîne d'approvisionnement circulaire
	Présence de risques	Niveau de pertes financières potentielles pour l'administration publique locale
	Commercialisation	Niveau d'opérations commerciales impliquées dans la recirculation des matières résiduelles
	Fonction de travail spécialisée	Niveau d'impact de l'introduction d'une nouvelle fonction de travail spécialisée sur la relativité de la structure salariale de l'administration publique locale
Social	Acceptabilité sociale	Niveau d'approbation et de soutien des citoyens locaux
	Nombre de parties prenantes	Niveau de parties prenantes impactées par la chaîne d'approvisionnement circulaire
	Collaboration entre les parties prenantes	Niveau de confiance et de communication dans les interactions actuelles entre les parties prenantes
	Partage des bénéfices	Niveau d'avantage lié à la distribution des bénéfices financiers entre les parties prenantes

3.3 Construction de la grille d'évaluation

La troisième étape de conception de l'outil consiste à construire la grille d'évaluation avec les modèles de gouvernance potentiels et les critères de performance. Cette étude suppose une importance égale entre les critères. Pour chaque critère de performance, une échelle ordinale de pointage à cinq niveaux est utilisée pour évaluer les modèles de gouvernance, en les classant du plus approprié (5) au moins approprié (1), selon deux niveaux du critère : faible et élevé. Ce classement distinct par ordre de priorité pour chaque modèle de gouvernance crée des écarts de performance clairs qui imposent une prise de décision. À noter que lors du classement, les divers avantages et inconvénients des modèles de gouvernance (cf. Tableau 4) sont pris en compte en vérifiant si chaque caractéristique impacte ou non un critère lors de son évaluation. Les pointages des critères résultants de cette démarche sont fixes et préindiqués dans la grille.

La grille d'évaluation ainsi construite (Tableau 6) permet de comparer la performance des modèles de gouvernance à répondre aux besoins de gestion des matières résiduelles des administrations publiques locales, facilitant la présélection d'un modèle de gouvernance.

Tableau 6. Grille d'évaluation pour la présélection d'un modèle de gouvernance

Critère		Modèle de gouvernance									
		PI		PC		D		Co		Cl	
Stratégique	Viabilité à long terme	3	3	4	2	5	1	2	4	1	5
	Volonté de contrôle	1	5	2	4	5	1	3	3	4	2
	Compatibilité avec l'activité principale	1	5	2	4	5	1	3	3	4	2
	Contribution significative de tiers	5	1	4	2	3	3	2	5	1	4
Financier	Rentabilité financière	5	3	4	2	3	1	2	5	1	4
	Présence de risques	5	1	4	2	3	5	2	3	1	4
	Commercialisation	5	1	4	2	1	5	3	3	2	4
	Fonction de travail spécialisée	5	1	4	2	3	5	2	4	1	3
Social	Acceptabilité sociale	5	1	4	2	1	3	2	5	3	4
	Nombre de parties prenantes	3	3	4	2	5	1	2	4	1	5
	Collaboration entre les parties prenantes	5	1	4	2	1	3	2	5	3	4
	Partage des bénéfices	5	2	4	3	1	1	2	5	3	4
Score											

3.4 Présélection d'un modèle de gouvernance

La première étape d'utilisation de l'outil consiste à présélectionner un modèle de gouvernance en complétant la grille d'évaluation par l'attribution de pointages aux critères de performance pour chaque modèle de gouvernance potentiel. Pour ce faire, les administrations publiques locales évaluent d'abord si chaque critère de performance a un niveau faible, moyen ou élevé pour la chaîne d'approvisionnement circulaire considérée. En fonction du niveau établi, elles peuvent ensuite indiquer le pointage pour chaque modèle de gouvernance (faible : pointage préindiqué dans la colonne de gauche, moyen : moyenne des deux pointages préindiqués, élevé : pointage préindiqué dans la colonne de droite). Enfin, les scores des modèles de gouvernance peuvent être calculés en additionnant pour chacun les pointages attribués à chaque critère. À cet effet, la notation suivante est utilisée :

- m : Modèle de gouvernance, où $m \in \{1,\ldots,5\}$
- c : Critère de performance, où $c \in \{1,\ldots,12\}$
- p_{mc} : Pointage du modèle de gouvernance m pour le critère c
- S_m : Score du modèle de gouvernance m

Les scores des modèles de gouvernance sont calculés selon l'équation suivante : $S_m = \sum_{c=1}^{12} p_{mc}$.

Le modèle de gouvernance présélectionné est celui qui a obtenu le score le plus élevé.

3.5 Considération de conditions particulières

La deuxième étape d'utilisation de l'outil consiste à considérer des conditions particulières ne pouvant être évaluées comme des critères à l'aide de l'échelle de pointage de la grille d'évaluation, en raison de leur spécificité à la chaîne d'approvisionnement circulaire considérée. Les administrations publiques locales doivent, une fois la présélection du modèle de gouvernance complétée à l'aide de la grille, considérer certaines conditions particulières. Issues à la fois de la littérature [Arfaoui et al., 2022] et d'échanges avec des experts en administration publique, trois conditions particulières préliminaires, représentant potentiellement des bénéfices ou des contraintes importants pour les modèles de gouvernance, ont été identifiées :

- **Incitation financière :** Éligibilité à des aides financières spécifiques (subventions, taux de financement favorables, réductions importantes sur les achats, etc.)
- **Cadre réglementaire :** Impact du cadre réglementaire de l'entité légale (capacité juridique, fiscalité, politiques, etc.)
- **Atténuation des risques :** Capacité de gestion des incertitudes et de protection des actifs (assurance, fonds de réserve, etc.)

Pour chaque modèle de gouvernance, les administrations publiques locales doivent déterminer si chacune de ces conditions particulières constitue un bénéfice, une contrainte, ou si elle est non applicable. Conséquemment, au-delà des scores obtenus dans la grille d'évaluation, ces conditions peuvent influencer significativement la sélection du modèle de gouvernance ou aider à départager des modèles ayant des scores similaires.

L'outil d'aide à la décision proposé dans cette section peut être utilisé pour différentes catégories de matières résiduelles dans divers contextes de chaînes d'approvisionnement circulaires.

4 Résultats et discussion

Cette section présente deux analyses de sensibilité reliées aux scores potentiels des cinq modèles de gouvernance, réalisées à partir des pointages préindiqués dans la grille d'évaluation (cf. Tableau 6). Ces analyses permettent de déterminer si certains modèles de gouvernance sont favorisés ou défavorisés par rapport aux autres lors de la sélection, indépendamment de l'évaluation des critères de performance et de la considération de conditions particulières dans une chaîne d'approvisionnement circulaire.

La Figure 4 illustre les scores minimum et maximum que peuvent obtenir les cinq modèles de gouvernance à la suite de l'évaluation des douze critères de performance avec la grille d'évaluation, sur un score potentiel de 60 points.

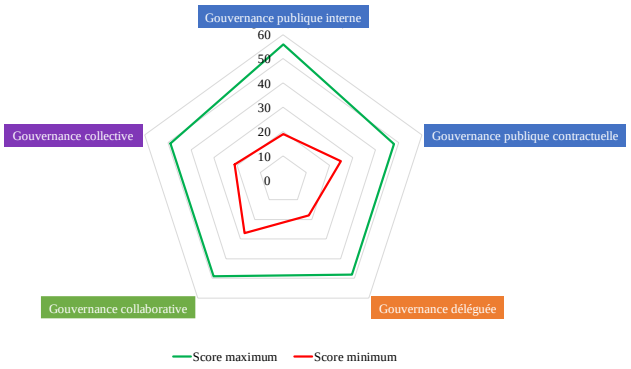


Figure 4. Scores minimum et maximum des modèles de gouvernance

Cette analyse révèle que deux modèles de gouvernance se distinguent. Le modèle de gouvernance collaborative obtient le score minimum le plus élevé (27 points) et présente l'étendue des scores la plus réduite, démontrant une meilleure polyvalence pour s'adapter à divers contextes d'économie circulaire pour la gestion des matières résiduelles. Le modèle de gouvernance publique interne obtient le score maximum le plus élevé (56 points), suggérant une probabilité supérieure d'être sélectionné en raison de sa meilleure performance globale. Les autres scores potentiels minimum et maximum

sont relativement semblables, offrant à chaque modèle de gouvernance des chances comparables d'être sélectionné.

La Figure 5 illustre les probabilités de sélectionner un modèle de gouvernance pour les 81 scénarios possibles (évaluation de quatre critères selon trois niveaux) de chacune des trois catégories de critères de performance : stratégique, financier et social.

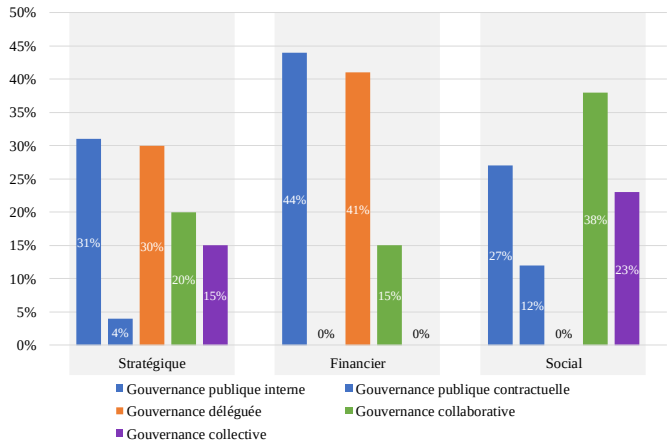


Figure 5. Probabilités de sélection des modèles de gouvernance selon les catégories de critères de performance

Cette analyse révèle que la catégorie des critères stratégiques favorise les modèles de gouvernance publique interne et déléguée, mais défavorise le modèle de gouvernance publique contractuelle. La catégorie des critères financiers favorise également les modèles de gouvernance publique interne et déléguée, mais défavorise les modèles de gouvernance publique contractuelle et collective. La catégorie des critères sociaux favorise le modèle de gouvernance collaborative, mais défavorise le modèle de gouvernance déléguée.

L'exploration d'une partie seulement des scénarios possibles permet de faire certaines constatations globales préliminaires, toutes catégories confondues. Le modèle de gouvernance publique interne est plus susceptible d'être sélectionné pour la gestion des matières résiduelles dans une chaîne d'approvisionnement circulaire, contrairement aux modèles de gouvernance publique contractuelle et collective, qui présentent une probabilité plus faible d'être sélectionnés.

5 Conclusion

La transition vers l'économie circulaire pour la recirculation des matières résiduelles générées ou prises en charge par les administrations publiques locales dans le cadre de services publics nécessite la mise en place d'un modèle de gouvernance approprié. Toutefois, selon les parties prenantes impliquées et la distribution des responsabilités de la gestion des matières résiduelles, il existe une diversité de modèles de gouvernance potentiels. Afin de guider les administrations publiques locales dans la sélection du modèle de gouvernance de la gestion des matières résiduelles à mettre en œuvre selon les spécificités de la chaîne d'approvisionnement circulaire, un outil d'aide à la décision est proposé. Cet outil, fondé sur une grille d'évaluation multicritère, permet d'évaluer la performance relative des modèles de gouvernance potentiels. Il offre ainsi une approche structurée pour prendre des décisions éclairées, adaptée aux enjeux spécifiques de chaque contexte.

Il convient néanmoins de souligner que l'outil d'aide à la décision proposé présente les limites suivantes :

- Les modèles de gouvernance sont des cadres généraux nécessitant des adaptations au niveau des clauses contractuelles pour être opérationnalisés en fonction des spécificités de la chaîne d'approvisionnement circulaire.
- L'évaluation des critères de performance avec une échelle de pointage ordinale ne permet pas de représenter précisément les variations de performance entre les modèles de gouvernance.
- L'attribution d'une pondération égale entre les critères de performance peut négliger l'importance de certains d'entre eux selon les objectifs et les priorités spécifiques de l'administration publique locale.
- L'application de l'outil peut aboutir à des scores identiques (≈ 10% des scénarios) ou similaires entre certains modèles de gouvernance et ne tient pas compte d'éventuelles orientations politiques. Il revient donc à l'administration publique locale de départager.

Des travaux futurs sont envisagés pour compléter et renforcer la proposition. D'abord, la liste des critères de performance des modèles de gouvernance (cf. Tableau 5), ainsi que celle des conditions particulières (cf. section 3.5), seront validées et enrichies lors de l'organisation d'un *focus group*. Cette méthode qualitative de collecte de données, consistant en une entrevue semi-structurée avec un groupe de 6 à 10 experts occupant un poste en gestion des matières résiduelles au sein d'une administration publique ou d'une organisation œuvrant dans ce secteur, permettra de générer des données consensuelles sur les critères les plus pertinents [Robson et McCartan, 2016]. Ensuite, le classement des pointages de performance de chaque critère en fonction des modèles de gouvernance, préindiqués dans la grille d'évaluation (cf. Tableau 6), sera également validé et justifié. Enfin, une démonstration empirique de l'outil d'aide à la décision à travers des études de cas servira à valider son applicabilité pour la gestion des matières résiduelles par les administrations publiques locales dans divers contextes d'économie circulaire. À terme, ce travail contribuera à renforcer la mise en œuvre de chaînes d'approvisionnement circulaires pérennes pour la gestion des matières résiduelles des administrations publiques locales.

Remerciements

Le travail présenté dans cet article est financé par le Fonds de Recherche du Québec – Société et Culture grâce à une bourse de doctorat en recherche (https://doi.org/10.69777/306190) et par le Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies grâce au programme Visage Municipal (https://doi.org/10.69777/336855). Ce soutien est grandement apprécié.

Références

Aitken, J., & Harrison, A. (2013). Supply governance structures for reverse logistics systems. International *Journal of Operations & Production Management*, 33(6), 745-764.

Antonioli, B., & Massarutto, A. (2012). The municipal waste management sector in europe: shifting boundaries between public service and the market. *Annals of Public and Cooperative Economics*, 83(4), 505-532.

Arfaoui, N., Le Bas, C., Vernier, M.-F., & Vo, L.-C. (2022). How do governance arrangements matter in the circular economy? Lessons from five methanation projects based on the social-ecological system framework. *Ecological Economics*, 197.

Bugge, M. M., Fevolden, A. M., & Klitkou, A. (2019). Governance for system optimization and system change: the case of urban waste. *Research Policy*, 48(4), 1076-1090.

Bulkeley, H., Watson, M., & Hudson, R. (2007). Modes of governing municipal waste. *Environment and Planning a: Economy and Space*, 39(11), 2733-2753.

Bulkeley, H., Watson, M., Hudson, R., & Weaver, P. (2005). Governing municipal waste: towards a new analytical framework. *Journal of Environmental Policy & Planning*, 7(1), 1-23.

Christensen, T. B. (2021). Towards a circular economy in cities: Exploring local modes of governance in the transition towards a circular economy in construction and textile recycling. *Journal of Cleaner Production*, 305, 127058.

Cramer, J. (2022). Effective governance of circular economies: an international comparison. *Journal of Cleaner Production*, 343, 130874.

Ghosh, A., & Fedorowicz, J. (2008). The role of trust in supply chain governance. *Business Process Management Journal*, 14(4), 453-470.

Guzman, G., & De Souza, M. M. P. (2018). Shifting modes of governing municipal waste – a sociology of translation approach. *Environment and Planning a: Economy and Space*, 50(4), 922-938.

Kirchherr, J., Piscicelli, L., Bour, R., Kostense-Smit, E., Muller, J., Huibrechtse-Truijens, A., & Hekkert, M. (2018). Barriers to the circular economy: Evidence from the European Union (EU). *Ecological Economics*, 150, 264-272.

Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular economy: The concept and its limitations. *Ecological Economics*, 143, 37-46.

Kristensen, H. S., & Mosgaard, M. A. (2020). A review of micro level indicators for a circular economy - moving away from the three dimensions of sustainability? *Journal of Cleaner Production*, 243, 118531.

Li, W. (2021). Innovating the Design and Implementation of an Integrated and Sustainable Waste Management System (ISWMS) - A hybrid approach. *The Business and Management Review*, 293.

Maaß, O., & Grundmann, P. (2018). Governing transactions and interdependences between linked value chains in a circular economy: the case of wastewater reuse in braunschweig (germany). *Sustainability*, 10(4), 1125.

Merli, R., Preziosi, M., & Acampora, A. (2018). How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 178, 703-722.

Minoja, M., & Romano, G. (2024). Effective stakeholder governance in circular economy: Insights from Italian companies. *Journal of Cleaner Production*, 474, 143584.

Obersteg, A., Arlati, A., Acke, A., Berruti, G., Czapiewski, K., Dąbrowski, M., ... & Knieling, J. (2019). Urban regions shifting to circular economy: Understanding challenges for new ways of governance. *Urban Planning*, 4(3), 19-31.

Patala, S., Albareda, L., & Halme, M. (2022). Polycentric Governance of Privately Owned Resources in Circular Economy Systems. *The Journal of Management Studies*, 59(6), 1563-1596.

Patterson, J., Schulz, K., Vervoort, J., van der Hel, S., Widerberg, O., Adler, C., Hurlbert, M., Anderton, K., Sethi, M., & Barau, A. (2017). Exploring the governance and politics of transformations towards sustainability. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 24, 1-16.

Pollans, L. B. (2017). Trapped in trash: 'modes of governing' and barriers to transitioning to sustainable waste management. *Environment and Planning a: Economy and Space*, 49(10), 2300-2323.

Pratt, A. C. (2022). Toward circular governance in the culture and creative economy: learning the lessons from the circular economy and environment. *City, Culture and Society*, 29, 100450.

Recyc-Québec. (2022). *Révision des plans de gestion des matières résiduelles (PGMR) – Guide d'accompagnement à l'intention des organismes municipaux*, 3.

Robson, C., & McCartan, K. (2016). *Real world research: a resource for users of social research methods in applied settings*, 4th edition. John Wiley & Sons.

Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y., Cluzel François, & Kendall, A. (2019). A taxonomy of circular economy indicators. *Journal of Cleaner Production*, 207, 542-559.

Schultz, F. C., Valentinov, V., Kirchherr, J., Reinhardt, R. J., & Pies, I. (2024). Stakeholder governance to facilitate collaboration for a systemic circular economy transition: A qualitative study in the European chemicals and plastics industry. *Business Strategy and the Environment*, 33(3), 2173-2192.

Sudusinghe, J. I., & Seuring, S. (2022). Supply chain collaboration and sustainability performance in circular economy: a systematic literature review. *International Journal of Production Economics*, 245, 108402.

van Veen-Dirks, P. M., & Verdaasdonk, P. J. (2009). The dynamic relation between management control and governance structure in a supply chain context. *Supply Chain Management: An International Journal*, 14(6), 466-478.

Werning, J. P., & Spinler, S. (2020). Transition to circular economy on firm level: Barrier identification and prioritization along the value chain. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118609.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Metaheuristic approach to design and address multi-echelon seafood closed-loop supply chain network

HAMZA CHOKR[1], ISSAM NOUAOUR[1], HAMID ALLAOUI[1], FRIDA BEN RAIS LASRAM[2]

[1] Univ. Artois, UR 3926, Laboratoire de Génie Informatique et d'Automatique de l'Artois (LGI2A), Université d'Artois, 62400 Béthune, France.
Hamza.Chokri@univ-artois.fr, Issam.Nouaouri@univ-artois.fr, Hamid.Allaoui@univ-artois.fr

[2] Univ. Littoral Côte d'Opale, Univ. Lille, CNRS, IRD, UMR 8187, LOG, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, F 62930 Wimereux, France.
frida.lasram@univ-littoral.fr

Abstract **–** In recent years, global demand for fish and seafood has significantly increased, underscoring the importance of fish protein as a primary animal protein source in many regions worldwide. Seafood is increasingly recognized as critical for addressing future food security challenges. However, the seafood industry generates substantial waste, creating significant management challenges. To address this, the present study introduces an efficient multi-echelon Seafood Supply Chain Network (SSCN) designed to manage seafood industry by-products. These by-products can be effectively utilized by recycling industries, promoting environmental sustainability. This study employs a mixed-integer linear programming (MILP) model to solve the location-allocation problem inherent in SSCN design. Given the computational complexity of this problem, it is classified as NP-hard. To tackle this complexity, a Modified Simulated Annealing (MSA) algorithm is implemented. The algorithm's control parameters are optimized using the Taguchi method. Results indicate that the proposed methodology effectively handles large-scale problem instances.

Keywords **–** Closed-loop supply chain, Seafood valorization, Sustainability, Facility location problem, Modeling, Metaheuristics.

1 INTRODUCTION

Over the past decades, supply chains have gained significant attention from both academia and industry. The traditional forward supply chain approach has proven insufficient in addressing the end-of-life phase of products, which offers substantial opportunities for value creation across the supply chain. This limitation is particularly evident in the automotive sector (Quella & Belli, 2013). Similarly, materials once regarded as waste, such as by-products from agri-food supply chains, have become a promising area for investment, with specialized facilities emerging to process this waste in alignment with circular economy principles (Liao, Kaviyani-Charati, Hajiaghaei-Keshteli, & Diabat, 2020).

In recent years, reverse logistics has gained prominence, paving the way for the development of closed-loop supply chains (CLSCs), which integrate forward logistics with reverse/recovery processes (Stindt & Sahamie, 2014). Environmental challenges, such as waste generation and air pollution, remain critical concerns. CLSC frameworks, embedded within sustainable supply chain management, provide organizations with tools to minimize their environmental footprint (Reh, 2006). Additionally, these frameworks can enhance economic viability through cost savings, competitive advantages, and intangible benefits such as improved reputation (French, 2008). Agri-food products, particularly those derived from animal sources, play a pivotal role in many economies. Meat, seafood, and dairy are essential sources of protein, vitamins, and minerals in human diets (Li, Lan, & Saldanha-Da-Gama, 2019). While no single food provides all necessary nutrients, ocean fish are a particularly balanced source of nutrients that are difficult to obtain from other dietary sources (Liu & Ralston, 2021). The demographic trend has increased seafood consumption, with Asia and the European Union emerging as leading consumers over the past decade (Food & of the United Nations, 2023). This surge in demand has, in turn, driven a rise in waste generation, with approximately 35% of fish harvested through fisheries and aquaculture being discarded as waste (Murugan, et al., 2024). In this context, CLSCs are crucial for addressing both environmental and economic challenges by advancing sustainable practices within supply chain networks (Winkler, 2011). Seafood by-products, in addition to primary seafood products include a wide range of valuable biomolecules such as bioactive peptides, collagen, gelatin, fatty acids, enzymes, calcium, chitin, chitosan, biopolymers, and fish meals for pets and livestock (Lal, et al., 2023). Consequently, designing a logistics model to support the installation, distribution, and collection of seafood waste is essential for optimizing profitability and fostering the development of industries centered on seafood waste valorization. During the last decade, only a few numbers of researchers and academics have studied the seafood supply chain network design. (Purnomo, Wangsa, Rizky, Jauhari, & Zahria, 2022) introduced a fish CLSC network. Their study emphasized product allocation while addressing traceability costs and the environmental aspect of sustainability. (Chokri, Nouaouri, Allaoui, & Lasram, 2024) developed a single objective CLSC focusing more on waste generated by end customers. (Fasihi M. , Tavakkoli-

Moghaddam, Najafi, & Hajiaghaei, 2021) (Fasihi M. , Tavakkoli-Moghaddam, Najafi, & Hajiaghaei-Keshteli, 2021) (Fasihi, Tavakkoli-Moghaddam, Hajiaghaei-Keshteli, & Najafi, 2023) have formulated three distinct CLSCN in their research. The first model, characterized by a single-period framework, was addressed utilizing the epsilon-constraint method and Lp-metric (Fasihi M. , Tavakkoli-Moghaddam, Najafi, & Hajiaghaei-Keshteli, 2021). In the second model, a multi-period fish supply chain network was devised, employing metaheuristic optimizers to effectively address challenges associated with large-sized problems (Fasihi M. , Tavakkoli-Moghaddam, Najafi, & Hajiaghaei, 2021). In the final model, uncertainty in demand was incorporated, aiming to minimize the total cost and CO2 emissions generated by vehicles of varying capacities and utilizing different fuels, while simultaneously ensuring responsiveness to client demand. A combination of exact, metaheuristic, and hybrid metaheuristic algorithms were utilized to effectively solve the proposed model (Fasihi, Tavakkoli-Moghaddam, Hajiaghaei-Keshteli, & Najafi, 2023). (Mosallanezhad, Hajiaghaei-Keshteli, & Triki, Shrimp closed-loop supply chain network design, 2021) (Mosallanezhad, et al., 2023) developed a single-objective MILP in 2021 to minimize the total cost of the shrimp closed loop supply chain network. In 2023, they incorporated the environmental dimension of sustainability into the proposed models. Metaheuristic algorithms were employed to solve these models. In 2023, (Yixuan, Ya, & Nuo, 2023) developed a MILP model that encompasses three-echelon nodes within the fisheries supply chain network. The objectives of the model are twofold: firstly, to maximize the fishery resource zones within selected fishery production areas. Secondly, to minimize the total cost associated with the constructed network. The perishable nature of seafood products and the amount of waste generated make it difficult for practitioners in the domain to better manage this waste, especially during transportation. As a pivotal target of the seafood supply chain, customers generate a significant amount of waste that many researchers haven't taken into consideration. This research has been specifically designed to address the reuse of by-products generated by actors within the seafood supply chain. The incorporation of reverse logistics into the seafood supply chain represents a novel concept. A review of the existing literature reveals that limited research has been conducted on this topic within the supply chain domain. Consequently, this study contributes to the discourse on an emerging and significant subject. Furthermore, prior studies on seafood products have predominantly focused on the distribution and management of goods, with limited attention to the reuse of seafood waste in a manner that minimizes environmental impact. This study introduces a novel optimization model aimed at addressing the management of seafood by-products. A calibrated metaheuristic approach is employed to solve the proposed model, with the Taguchi method utilized for fine-tuning its parameters.

2 PROBLEM DEFINITION

2.1 Case Description

The current supply chain network consists of various entities, including fish producers from both the fishery and aquaculture sectors, processing plants, canning factories, wholesalers, fish waste collectors, waste processing factories, pet food markets, and customers. In the forward flow, illustrated in Figure 1, fish captured from fisheries or harvested from aquaculture farms are transported from the production sites to processing centers and factories, depending on their production capacities. At the processing centers, the fish undergo essential procedures such as cleaning, gutting, filleting, and deboning. Subsequently, the fish are sent to factories where further processes take place, including filleting, cooking, filling, adding liquid or sauce, sealing, sterilization, and cooling. After these stages, the factories and processing units transport the finished products to wholesalers. The wholesalers then distribute these products to end customers, including retailers, fishmongers, supermarkets, and hypermarkets. In the reverse logistics flow, waste and deteriorated fish generated by customers are collected by designated collection centers. For other actors in the supply chain, waste and deteriorated fish are directly transported to waste processing factories, where they are transformed into powder suitable for poultry and livestock feed markets, as well as oil and collagen for pharmaceutical needs.

2.2 Assumptions

- The model is a single-period, single-product mixed integer linear programming model.
- Waste is generated by processing units, factories, wholesalers and customers.
- The locations of the fisheries, aquaculture farms, customers, by-products markets are considered fixed. On the other hand, the processing centers, factories, wholesalers, collector centers, and waste powder fac- tories are assumed as potential locations.
- Market and by-product market demand must be satisfied.

2.3 Model Description

Definitions of indices, parameters, and decision variables are presented as follows:

2.3.1 Notations

$i = 1, 2, \ldots, I$	The production location (fisher).
$j = 1, 2, \ldots, J$	The production location (aquaculture).
$k = 1, 2, \ldots, K$	The potential location of the processing unit.
$l = 1, 2, \ldots, L$	The potential location of the factory.
$m = 1, 2, \ldots, M$	The potential location of the wholesaler.
$n = 1, 2, \ldots, N$	The potential location of the collector center.
$o = 1, 2, \ldots, O$	The potential location of the waste powder factory.
$p = 1, 2, \ldots, P$	The customer index.
$q1 = 1, 2, \ldots, P$	The poultry and livestock market index.
$q2 = 1, 2, \ldots, P$	The pharmaceutical factories index.
$q = q1 + q2$	Reverse customer's locations index.
f_k	Fixed cost of opening processing unit k.
f_l	Fixed cost of opening factory l.
f_m	Fixed cost of opening wholesaler m.
f_n	Fixed cost of opening collector center n.
f_o	Fixed cost of opening waste powder factory o.
Cx_{ik}	Transport cost from fisher i *to* processing unit k.
Cy_{il}	Transport cost from fisher i to factory l.
Cu_{jk}	Transport cost from aquaculture farmer j to processing unit k.
Cb_{jl}	Transport cost from aquaculture farmer j to factory l.
Cl_{km}	Transport cost from processing unit k to wholesaler m.
Cn_{lm}	Transport cost from factory l to wholesaler m.
Cp_{mp}	Transport cost from wholesaler m to customer p.
Cw_{ko}	Transport cost of waste products from processing unit k to waste powder factory o.
Cw_{lo}	Transport cost of waste products from factory l to waste powder factory o.
Cw_{mo}	Transport cost of low-quality products from whole- saler m to waste powder factory o.

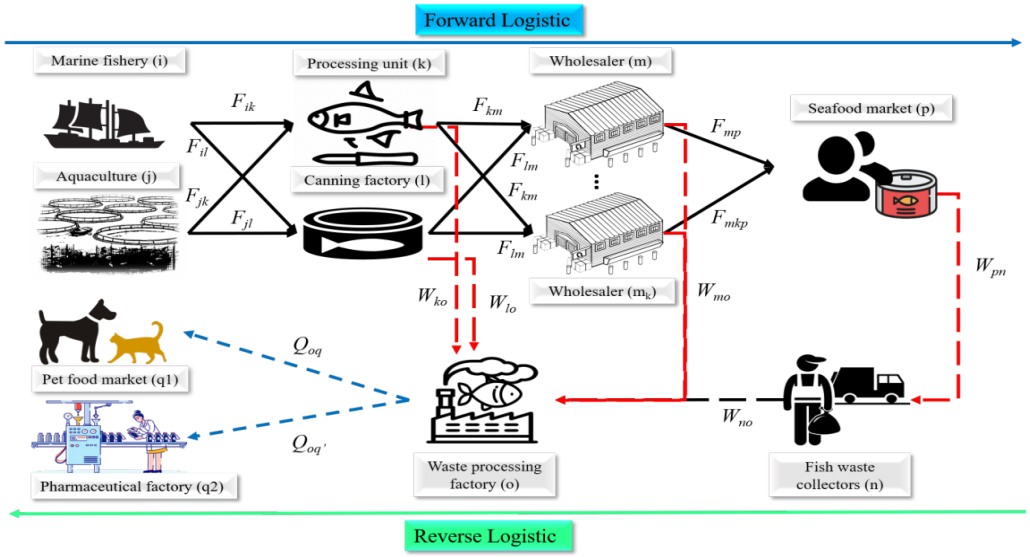


Fig.1:Seafood CLSC Network.

Cw_{pn}	Transport cost of low-quality products from customer p to collector center n.
Cw_{po}	Transport cost of waste products from collector center n to waste powder factory o.
Cc_{oq}	Transport cost of products from waste powder fac- tory o to poultry and livestock market q.
λ_i	Production capacity of fisher i.
λ_j	Production capacity of aquaculture farmer j.
λU_k	Production capacity of processing unit k.
λF_l	Production capacity of factory l.
λW_m	Holding capacity at wholesaler m.
λC_n	Holding capacity at collector center n.
λP_o	Production capacity of waste powder factory a
γW_m	Waste percentage by wholesaler m.
γP_k	Waste percentage by processing unit k.
γF_l	Waste percentage by factory l.
γC_p	Waste percentage by customer p.
DC_p	Product demand by customer p.
DP_q	Waste powder demand by market q.

2.3.2 Decision Variables

Q_i	Quantity produced by fisher i.
Q_j	Quantity produced by aquaculture farmer j.
F_{ik}	Quantity of product transported from fisher i to processing unit k.
F_{il}	Quantity of product transported from fisher i to factory l.
F_{jk}	Quantity of product transported from aquacul- ture farmer j to processing unit k.
F_{jl}	Quantity of product transported from aquacul- ture farmer j to factory l.
F_{km}	Quantity of product transported from process- ing unit k to wholesaler m.
F_{lm}	Quantity of product transported from factory l to wholesaler m.
F_{mp}	Quantity of product transported from whole- saler m to customer p.
W_{ko}	Quantity of fish waste transported from pro- cessing unit k to waste powder factory o.
W_{lo}	Quantity of fish waste transported from factory l to waste powder factory o.
W_{mo}	Quantity of low-quality products transported from wholesaler m to waste powder factory o.
W_{no}	Quantity of product transported from collector center n to waste powder factory o.
W_{pn}	Quantity of fish waste transported from cus- tomer p to collector center n.
Q_{oq}	Quantity of product transported from waste powder factory o to poultry and livestock mar- ket q.
Y_m	Equal to 1 if wholesaler m is opened at the elected location, 0 otherwise.
X_k	Equal to 1 if processing unit k is opened at the elected location, 0 otherwise.
U_l	Equal to 1 if factory l is opened at the elected location, 0 otherwise.
S_o	Equal to 1 if waste factory o is opened at the elected location, 0 otherwise.
G_n	Equal to 1 if collector center n is opened at the elected location, 0 otherwise.

2.3.3 Mathematical Model

The objective function Z is:

$$\begin{aligned}\text{Min Z} = &\sum_{k=1}^{K} f_k X_k + \sum_{l=1}^{L} f_l U_l + \sum_{m=1}^{M} f_m Y_m + \sum_{n=1}^{N} f_n G_n + \sum_{o=1}^{O} f_o S_o + \sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K} Cx_{ik}F_{ik} \\ &+ \sum_{i=1}^{I}\sum_{l=1}^{L} Cy_{il}F_{il} + \sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K} Cu_{jk}F_{jk} + \sum_{j=1}^{J}\sum_{l=1}^{L} Cb_{jl}F_{jl} \\ &+ \sum_{k=1}^{K}\sum_{m=1}^{M} Cl_{km}F_{km} + \sum_{l=1}^{L}\sum_{m=1}^{M} Cn_{lm}F_{lm} + \sum_{m=1}^{M}\sum_{p=1}^{P} Cp_{mp}F_{mp} \\ &+ \sum_{k=1}^{K}\sum_{o=1}^{O} Cw_{ko}W_{ko} + \sum_{l=1}^{L}\sum_{o=1}^{O} Cw_{lo}W_{lo} + \sum_{m=1}^{M}\sum_{o=1}^{O} Cw_{mo}W_{mo} \\ &+ \sum_{p=1}^{P}\sum_{n=1}^{N} Cw_{pn}W_{pn} + \sum_{n=1}^{N}\sum_{o=1}^{O} Cw_{no}W_{no} + \sum_{o=1}^{O}\sum_{q=1}^{Q} Cc_{oq}Q_{oq}\end{aligned} \quad (1)$$

Regarding the cost function Z, it minimizes the total cost including fixed opening costs and transportation costs. Some

relevant constraints are introduced in alignment with the objective and problem definition.

The flow of fish products between marine fisheries (i) and auqaculture farmers (j) is handled using Eqs. (2)–(5) Constraints (2) guarantee that the amount of fish transported from marine fisheries to processing units denoted by Fik and to canning factories denoted by Fil should be equal to production from the marine fisheries. Constraint (4) assures that the quantity produced by marine fisheries should be less than or equal to the maximum capacity of the marine fishery λi. Constraints (3) guarantee that the amount of fish transported from auqaculture farmers to processing units denoted by Fjk and to canning factories denoted by Fjl should be equal to the total production of auqaculture farmers. Constraint (5) assures that the quantity produced by auqaculture farmers should be less than or equal to the maximum capacity of the auqaculture farmer λj.

$$\sum_{k=1}^{K} F_{ik} + \sum_{l=1}^{L} F_{il} = Q_i \quad \forall i \in \mathrm{I} \tag{2}$$

$$\sum_{k=1}^{K} F_{jk} + \sum_{l=1}^{L} F_{jl} = Q_j \quad \forall j \in \mathrm{J} \tag{3}$$

$$Q_i \le \lambda_i \quad \forall i \in \mathrm{I} \tag{4}$$

$$Q_j \le \lambda_j \quad \forall j \in \mathrm{J} \tag{5}$$

Constraint (6) and (7) ensure the opening of the processing unit and canning factory locations when products are sent by the producers.

$$\sum_{i=1}^{I} F_{ik} + \sum_{j=1}^{J} F_{jk} \le \lambda_{U_k} \times X_k \quad \forall k \in \mathrm{K} \tag{6}$$

$$\sum_{i=1}^{I} F_{il} + \sum_{j=1}^{J} F_{jl} \le \lambda_{F_l} \times U_l \quad \forall l \in \mathrm{L} \tag{7}$$

After the seafood products are sent for cleaning, gutting, filleting, and deboning in the processing units (K). Filleting, cooking, filling, adding liquid and sauce, sealing, sterilization, and cooling in the seafood factories (L), a portion becomes waste that must be shipped to a waste processing factory, while the processed and canned portion is sent to wholesalers. Thus, constraints (8–11) ensure that the quantities of fresh and waste products do not exceed their availability.

$$\left(\sum_{i=1}^{I} F_{ik} + \sum_{j=1}^{J} F_{jk}\right) \times \left(1 - \gamma_{P_k}\right) \ge \sum_{m=1}^{M} F_{km}, \forall k \in \mathrm{K} \tag{8}$$

$$\left(\sum_{i=1}^{I} F_{ik} + \sum_{j=1}^{J} F_{jk}\right) \times \gamma_{P_k} \ge \sum_{o=1}^{O} W_{ko} \quad \forall k \in \mathrm{K} \tag{9}$$

$$\left(\sum_{i=1}^{I} F_{il} + \sum_{j=1}^{J} F_{jl}\right) \times \left(1 - \gamma_{F_l}\right) \ge \sum_{m=1}^{M} F_{lm}, \quad \forall l \in \mathrm{L} \tag{10}$$

$$\left(\sum_{i=1}^{I} F_{il} + \sum_{j=1}^{J} F_{jl}\right) \times \gamma_{F_l} \ge \sum_{o=1}^{O} W_{lo} \quad \forall l \in \mathrm{L} \tag{11}$$

At the wholesalers level (M), products are ready to be shipped to the end customers. Meanwhile, a portion may deteriorate and must be sent to the waste factory. Constraints (12–13) ensure that the quantities of fresh and waste products sent from the wholesalers do not exceed their availability. Equation (14) ensures the opening and capacity compliance of the wholesaler when products are received. Equation (15) ensures that the portion of waste generated by the end customers needs to be collected by the collector center (N).

$$\left(\sum_{k=1}^{K} F_{km} + \sum_{l=1}^{L} F_{lm}\right) \times \left(1 - \gamma_{W_m}\right) \ge \sum_{p=1}^{P} F_{mp} \; \forall m \in \mathrm{M} \tag{12}$$

$$\left(\sum_{k=1}^{K} F_{km} + \sum_{l=1}^{L} F_{lm}\right) \times \gamma_{W_m} \ge \sum_{o=1}^{O} W_{mo} \quad \forall m \in \mathrm{M} \tag{13}$$

$$\sum_{k=1}^{K} F_{km} + \sum_{l=1}^{L} F_{lm} \le \lambda_{W_m} \times Y_m \quad \forall m \in \mathrm{M} \tag{14}$$

$$\sum_{n=1}^{N} W_{pn} = \left(\sum_{m=1}^{M} F_{mp}\right) \times \gamma_{C_p} \quad \forall p \in \mathrm{P} \tag{15}$$

As described, the objective of the location-allocation problem is to design an optimized network for seafood products. Therefore, the optimal locations and the required number of facilities must be determined. Constraints (16–20) specify that a facility must be open as a prerequisite for the shipment of seafood waste to both waste factories (O) and collector centers (N).

$$\sum_{i=1}^{I} W_{ko} \le \lambda_{P_o} \times S_o \quad \forall o \in \mathrm{O} \tag{16}$$

$$\sum_{i=1}^{I} W_{lo} \le \lambda_{P_o} \times S_o \quad \forall o \in \mathrm{O} \tag{17}$$

$$\sum_{i=1}^{I} W_{mo} \le \lambda_{P_o} \times S_o \quad \forall o \in \mathrm{O} \tag{18}$$

$$\sum_{i=1}^{I} W_{no} \le \lambda_{P_o} \times S_o \quad \forall o \in \mathrm{O} \tag{19}$$

$$\sum_{p=1}^{J} W_{pn} \le \lambda_{C_n} \times G_n \quad \forall n \in \mathrm{N} \tag{20}$$

Equation (21) ensure that the quantity collected by the collector center is sent to the waste factory.

$$\sum_{p=1}^{J} W_{pn} \ge \sum_{o=1}^{O} W_{no} \quad \forall n \in \mathrm{N} \tag{21}$$

At the waste processing factory level, where seafood waste is transformed into by-products such as collagen, gelatin, and fish meal for pets and livestock, these products must be delivered to end customers. Constraints (22) ensure that the quantity of by-products sent from waste processing factories to reverse markets does not exceed the available supply.

$$\left(\sum_{j=1}^{J} W_{ko} + \sum_{j=1}^{J} W_{lo} + \sum_{j=1}^{J} W_{mo} + \sum_{j=1}^{J} W_{no}\right) \ge \sum_{q=1}^{Q} Q_{oq} \quad \forall o \in \mathrm{O} \tag{22}$$

Constraint (23-24) guarantees the demand satisfaction of the forward and reverse seafood markets.

$$\sum_{p=1}^{P} F_{mp} = DC_p \quad \forall p \in \mathrm{P} \tag{23}$$

$$\sum_{o=1}^{O} Q_{oq} = DP_q \quad \forall q \in \mathrm{Q} \tag{24}$$

Constraint (25) represents binary variables, and constraints (26) ensure the nonnegative decision variables.

$$Y_m, X_k, U_l, S_o, G_n \in \{0,1\} \forall m \in M, k \in K, l \in L, o \in O, 1 \tag{25}$$

$$Q_i, Q_j, F_{ik}, F_{jk}, F_{jl}, F_{km}, F_{lm}, F_{mp}, L_{pn}, W_{ko}, W_{lo}, W_{mo}, W_{pn}, W_{no}, Q_{oq} \ge 0 \; \forall i \in I, j \in J, k \in K, l \in L, m \in M, p \in P, o \in O, n \in N, q \in Q \tag{26}$$

The proposed model is a mixed-integer linear program (MILP), and its complexity increases as the number of stakeholders in the supply chain grows, including marine fisheries, aquaculture farms, processing units, canning factories, wholesalers, waste factories, collector centers, and both forward and reverse

seafood markets. to efficiently solve the problems within a reasonable time frame.

3 SOLUTION APPROACH

This study introduces a Mixed-Integer Linear Programming (MILP) model formulated to address seafood facility location–allocation problem, extending the proposed exact resolution method presented in (Chokri, Nouaouri, Allaoui, & Lasram, 2024). The location–allocation problem in supply chain management is widely recognized as an NP-hard problem (Cheraghalipour, Paydar, & Hajiaghaei-Keshteli, 2017). Utilizing exact solution methods for such problems is computationally expensive and inefficient, particularly to overcome these challenges, the Modified Simulated Annealing (MSA) (Yang, Ding, Wang, & Wu, 2020) algorithm is employed in this research to efficiently generate sub-optimal solutions. The subsequent sections present the proposed decoding scheme and the algorithm employed.

3.1 Encoding and Decoding

Several advanced techniques assist researchers in generating initial solutions for optimization problems, including matrix representation, spanning trees, Prüfer numbers, and priority-based encoding (Atabaki, Khamseh, & Mohammadi, 2019). Among these methods, priority-based encoding has emerged as a particularly robust approach for constructing feasible solutions to supply chain network design (SCND) problems (Akbari-Kasgari, Khademi-Zare, Fakhrzad, Hajiaghaei-Keshteli, & Honarvar, 2022). This method effectively addresses the limitations of alternative approaches, such as their inability to consistently satisfy feasibility criteria (Sadeghi-Moghaddam, Hajiaghaei-Keshteli, & Mahmoodjanloo, 2019).

Priority-based encoding operates by generating a uniformly distributed array with values ranging between 0 and 1, scaled to the dimensions of the problem. The array elements are then sorted in ascending or descending order, with integer labels assigned according to the rank of each cell. To elucidate this methodology, an illustrative example is presented in Fig.2, demonstrating the proposed encoding. To illustrate the adapted priority-based encoding method in the context of our proposed SCN model, Figure 7 presents a small-scale example demonstrating how constraints are satisfied. In this example, we assume the presence of three marine fisheries, three aquaculture farms, two processing units, one canning factory, two wholesalers, one fish waste collector, two waste processing factories, two seafood markets, and two reverse markets. The proposed encoding is a matrix with one row and (i + j + 3k + 3l + 3m + 2n + 2p + 2o + q) columns structured into six distinct sections, as depicted in Figure 2. The encoding process is initiated by generating a matrix with random values (RV) ranging between 0 and 1. These values are then sorted and transformed into a priority-based (PR) matrix for each subsegment, distinguishing between providers and receivers. To ensure compliance with the constraints associated with this encoding scheme, a decoding procedure for goods allocation is presented in Algorithm 1. For further clarification, the quantity of seafood products transported from marine fisheries and aquaculture farms (I + J) to processing units and factories (K + L) is determined in Section 1 of the encoding. This section ensures the fulfillment of constraints (2-5), which control the location and allocation of goods between facilities. Additionally, binary constraints, as defined in constraint (25), dictate the operational status of processing units (k) and canning factories (l), indicating whether a facility is opened. The same procedural approach is applied to satisfy all remaining constraints. Further explanations of the algorithms are provided in the subsequent

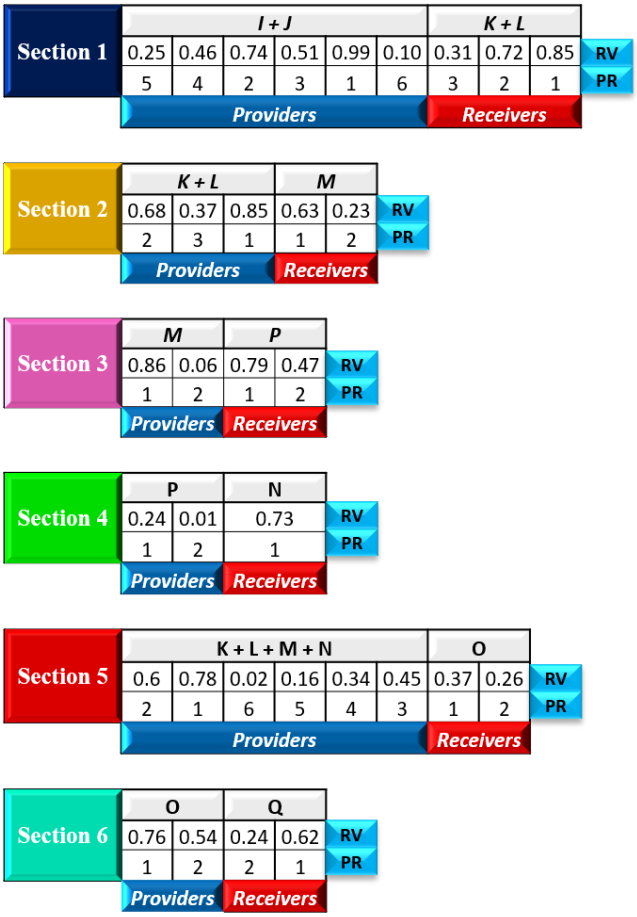


Figure 2 ; proposed encoding scheme

Algorithm 1 The proposed decoding algorithm

Input: P Set of providers.
R Set of receivers.
C_p Capacity of provider p.
D_r Demand of receiver r.
$S(P+R)$ Encode solution.
Output: $A_{loc_{pr}}$ Amount of shipment between nodes.
B_r Binary variables showing the opened destinations.
$A_{loc_{pr}} \leftarrow 0$
while $\sum_p C_p \geq 0$ **do**
  Select values of the first column of sub-segment P for p index
  Select values of the first column of sub-segment R for r index
  $A_{loc_{pr}} \leftarrow \min(C_p, D_r)$
  Update demand and capacities
  $C_p \leftarrow C_p - A_{loc_{pr}}$
  $D_r \leftarrow D_r - A_{loc_{pr}}$
  if $C_p = 0$ **then**
    $S(P+R) \leftarrow 0$
  end if
  if $D_r = 0$ **then**
    $S(P+R) \leftarrow 0$
  end if
end while
for $r = 1$ to R **do**
  if $\sum_r A_{loc_{pr}} \geq 0$ **then**
    $B_r \leftarrow 1$
  end if
end for

No.	Parameter	Value	Unit	No.	Parameter	Value	Unit
1	f_k	U~(300.000, 500.000)	Euro (€)	9	f_l	U~(300.000, 600.000)	Euro (€)
2	f_m	U~(100.000, 700.000)	Euro (€)	10	f_o	U~(200.000, 800.000)	Euro (€)
3	f_n	U~(50.000, 200.000)	Euro (€)	11	Cx_{ik},Cy_{il}, Cu_{jk},Cb_{jl}, Cl_{km}, Cn_{lm}, Cp_{mp}, Cw_{ko}, Cw_{lo}, Cw_{mo}, Cw_{pn} , Cw_{po}, Cc_{oq}	U~(200, 250)	Euro (€)
4	λ_i	U~(8000,10000)	Tons	12	λ_j	U~(7000,10000)	Tons
5	λ_{P_o}	U~(1500, 5000)	Tons	13	λ_{F_l}, λ_{U_k}, λ_{W_m}, λ_{C_n}	U~(2000, 4000)	Tons
6	γ_{W_m}	0.3	Percentage	14	γ_{P_k}	0.4	Percentage
7	γ_{F_l}	0.5	Percentage	15	γ_{C_p}	0.15	Percentage
8	DC_p	U~(200, 500)	Tons	16	DP_q	U~(20,80)	Tons

Table1 Model parameters

Instance	i	j	k	l	m	n	o	p	q
1	3	3	2	1	2	1	2	2	2
2	45	45	12	8	25	10	26	30	30
3	90	90	18	12	51	14	70	80	75
4	140	140	30	30	88	21	130	180	140
5	170	170	50	50	93	33	160	300	200
6	200	200	70	70	150	40	170	400	250

Table 2 General data of the test scenarios

3.2 Simulated annealing (SA)

Simulated Annealing (SA) is widely recognized as an effective single-point metaheuristic algorithm for locating global optima in the presence of numerous local optima (Kirkpatrick, Gelatt, & Vecchi, 1983). The algorithm has demonstrated superior performance in various domains, particularly in network design, as evidenced by prior studies (Rajabi-Kafshgar, Gholian-Jouybari, Seyedi, & Hajiaghaei-Keshteli, 2023). Additionally, multiple studies have employed SA to address supply chain (SC) optimization problems, including those presented in (Li, et al., 2024). The pseudocode for the general implementation of SA is outlined in *Algorithm.2*.

Algorithm 2 Pseudo-code for SA

```
Generate a random solution x
Initialize temperature T
Calculate the fitness value f(x)
for It = 1 to MaxIt do
    Pick a random neighbor x* from x
    Calculate δ ← f(x*) − f(x)
    if δ ≤ 0 then
        Accept x* as the new solution
    else
        Accept x* with probability exp(−δ/T)
    end if
    Update T ← α · T
    Update x* if better solution is found
end for
```

4 PARAMETER SETTING AND TUNING

This section provides an explanation of the model parameter settings, the tuning process for algorithm parameters, and the evaluation of the proposed algorithm's performance using the selected metrics. The algorithm was implemented in Python and executed on a PC equipped with 16 GB of RAM and a 2.2 GHz CPU. To optimize algorithm's control parameters, the Taguchi design of experiments was employed.

Algorithm	Factors	Levels			Optimum
		1	2	3	
SA	A. Maximum Iteration (*MaxIt*)	1000	2000	3000	**1000**
	B. Sub Iteration (*SubIt*)	10	20	30	**30**
	C. Initial Temperature (T)	10000	20000	30000	**30000**
	D. Temperature Coefficient (R)	0.9	0.95	0.99	**0.99**
	E. Local Search	Swap	Insertion	Reversion	**Swap**

Table 3 Algorithm Parameters at Optimum Level

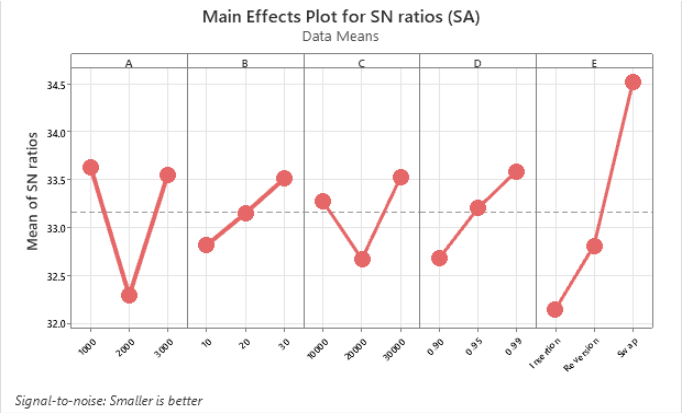


Figure 4 S/N plot for SA parameters

4.1 Parameter tuning

To validate the significance of the proposed model, six distinct sets of test problems were generated, as outlined in Table 2. The corresponding model parameters are provided in Table 1.

The algorithm parameters require careful tuning, and various techniques have been proposed for parameter optimization. Among these, the orthogonal array approach, as proposed by Taguchi (Kacker, Lagergren, & Filliben, 1991), is adopted in this study due to its effectiveness in the given context. In contrast to the computationally expensive and time-consuming full factorial design, this technique minimizes the number of experiments required, thereby optimizing the overall experimental process.

The experimental procedure begins with the identification of factors and their respective levels, followed by the design of experiments, as summarized in Table 3. The Taguchi method recommends the use of L27 orthogonal arrays for the proposed Modified Simulated Annealing (MSA). Each experimental

setup is executed thirty times, and the results are quantified as Relative Percentage Deviation (RPD). Equation (27) represents the RPD, the ratio of differences between the objective values in individual trials and the minimum objective value to the same minimum value under a trial of thirty runs. The computed RPD values are averaged and subsequently transformed into a Signal-to-Noise (*SN*) ratio. The *SN* ratio is defined mathematically in Equation (28), where *Y* represents the response variable, and n denotes the total number of orthogonal array trials. The *SN* ratio, illustrated in Fig. 4, characterizes the balance between the response variable (signal) and the standard deviation (noise), with higher SN ratios being preferable. For the current study, based on the objectives and the nature of the responses, the "smaller is better" criterion from the Taguchi method was adopted to optimize the system's performance.

$$RPD = \frac{Sol_{act} - Sol_{min}}{Sol_{min}} \qquad (27)$$

$$S/N = 10 \cdot \log\left(\frac{\sum Y^2}{n}\right) \qquad (28)$$

5 Results

This section evaluates the efficiency of the proposed model through a demonstration of the algorithm using generated problem instances. The final results are obtained by applying the optimal combination of algorithm parameters, as outlined in Table 3. As indicated in Table 4, the proposed MSA demonstrates its performance in computational time for large problem instances, achieving an average gap of 3%. The MSA proves to be an effective local search algorithm, consistently achieving optimal solutions across various real-world problems. Furthermore, this approach minimizes the likelihood of the algorithm becoming trapped in local minima, ensuring robust performance.

Instance	Approach	Objective function ($)	RPD	Computational time (sec.)	Gap
1	MILP	1999708.95	-	0.09	
	SA	1999883.71	0.0000	0.02	0.0001
2	MILP	16813296.21	-	81.00	
	SA	16902690.36	0.0161	221.04	0.0053
3	MILP	45522260.55	-	471.00	
	SA	45642795.49	0.0112	310.74	0.0026
4	MILP	111893295.51	-	*	
	SA	115714086.66	0.0115	1137.96	0.0341
5	MILP	182863125.13	-	*	
	SA	190503349.65	0.0135	1997.83	0.0418
6	MILP	241050978.49	-	*	
	SA	259034164.23	0.0108	2270.23	0.0746

(*) The asterisk indicates the lower bound.

Table 4 Final responses obtained.

The efficacy of the proposed solution method is evaluated using the Relative Percentage Deviation (RPD), which measures solution quality by comparing the deviation of the obtained solutions from the minimum solution. A lower RPD value indicates more effective solutions. To validate the algorithm's results, CPLEX is used as an exact solver. While exact solvers provide accurate results, they are often time-intensive and may fail to deliver solutions within a reasonable timeframe. High RPD values indicate instability in the algorithm's performance. To assess the algorithm's behavior, the average RPD across twenty test problems is considered. As presented in Table 4, the proposed MSA demonstrates stability with a low average RPD value of 0.01.

6 Conclusions

This study proposes a seafood supply chain network design within the framework of a circular economy. The research emphasizes the significance of incorporating a closed-loop concept to develop environmentally sustainable supply chains. The objective function, constraints, and test problems are formulated to evaluate the model's effectiveness. The proposed model is solved using a modified simulated annealing approach, demonstrating its performance for large instances compared to exact solvers in terms of computational time. The RPD method is employed to validate the algorithm's quality and confirm its stability.

One of the main limitations of this study, and the most significant, is the lack of real data related to the seafood industry due to confidentiality concerns.

Future research will focus on comparing the proposed metaheuristic with other approaches to assess its performance. Additionally, the study aims to develop a novel solution representation and resolution technique based on reinforcement learning algorithms.

Acknowledgements:
This work is supported by the graduate school IFSEA that benefits from a France 2030 grant (ANR-21-EXES-0011) operated by the French National Research Agency.

7 References

Akbari-Kasgari, M., Khademi-Zare, H., Fakhrzad, M. B., Hajiaghaei-Keshteli, M., & Honarvar, M. (2022). Designing a resilient and sustainable closed-loop supply chain network in copper industry. *Clean Technologies and Environmental Policy, 24*, 1553–1580.

Atabaki, M. S., Khamseh, A. A., & Mohammadi, M. (2019). A priority-based firefly algorithm for network design of a closed-loop supply chain with price-sensitive demand. *Computers & industrial engineering, 135*, 814–837.

Cheraghalipour, A., Paydar, M. M., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2017). An integrated approach for collection center selection in reverse logistics. *International Journal of Engineering, 30*, 1005–1016.

Chokri, H., Nouaouri, I., Allaoui, H., & Lasram, F. B. (2024). Seafood closed-loop supply chain network design. *2024 10th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, (pp. 2989–2994). doi:10.1109/CoDIT62066.2024.10708178

Chouhan, V. K., Khan, S. H., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2021). Metaheuristic approaches to design and address multi-echelon sugarcane closed-loop supply chain network. *Soft Computing, 25*, 11377–11404. doi:https://doi.org/10.1007/s00500-021-05943-

Chouhan, V. K., Khan, S. H., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2022). Hierarchical tri-level optimization model for effective use of by-products in a sugarcane supply chain network. *Applied Soft Computing, 128*, 109468. doi:https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109468

Chouhan, V. K., Khan, S. H., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2022). Sustainable planning and decision-making model for sugarcane mills considering environmental issues. *Journal of environmental management, 303*, 114252. doi:https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114252

Fasihi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Hajiaghaei-Keshteli, M., & Najafi, S. E. (2023). Designing a sustainable fish closed-loop supply chain network under uncertainty. *Environmental Science and Pollution Research, 30*, 90050–90087. doi:https://doi.org/10.1007/s11356-023-25877-x

Fasihi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Najafi, S. E., & Hajiaghaei, M. (2021). Optimizing a bi-objective multi-period fish closed-loop supply chain network design by three multi-objective meta-heuristic algorithms. *Scientia Iranica*. doi:10.24200/sci.2021.57930.5477

Fasihi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Najafi, S. E., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2021). Developing a bi-objective mathematical model to design the fish closed-loop supply chain. *International Journal of Engineering, 34*, 1257–1268.

Food, & of the United Nations, A. O. (2023). Production of Fish and Seafood – FAO [dataset]. *Production of Fish and Seafood – FAO [dataset]*. Récupéré sur https://ourworldindata.org/fish-and-overfishing

French, M. L. (2008). Improving sustainability through effective reuse of product returns: minimizing waste in a batch blending process environment. *Journal of Cleaner Production, 16*, 1679–1687. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.01.006

Kacker, R. N., Lagergren, E. S., & Filliben, J. J. (1991). Taguchi's orthogonal arrays are classical designs of experiments. *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology, 96*, 577.

Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science, 220*, 671–680.

Lal, J., Deb, S., Singh, S. K., Biswas, P., Debbarma, R., Yadav, N. K., . . . others. (2023). Diverse uses of valuable seafood processing industry waste for sustainability: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 1–15. doi:https://doi.org/10.1007/s11356-023-28890-2

Li, P., Lan, H., & Saldanha-Da-Gama, F. (2019). A bi-objective capacitated location-routing problem for multiple perishable commodities. *IEEE access, 7*, 136729–136742. doi:10.1109/ACCESS.2019.2941363

Li, Y., Xiang, N., Zhu, Y., Yang, M., Shi, C., Tang, Y., . . . Zhang, X. (2024). Blue source-based food alternative proteins: Exploring aquatic plant-based and cell-based sources for sustainable nutrition. *Trends in Food Science & Technology*, 104439. doi:https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104439

Liao, Y., Kaviyani-Charati, M., Hajiaghaei-Keshteli, M., & Diabat, A. (2020). Designing a closed-loop supply chain network for citrus fruits crates considering environmental and economic issues. *Journal of Manufacturing Systems, 55*, 199–220. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.02.001

Liu, C., & Ralston, N. V. (2021). Chapter Seven - Seafood and health: What you need to know? Dans F. Toldrá (Éd.). Academic Press. doi:https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2021.04.001

Mosallanezhad, B., Arjomandi, M. A., Hashemi-Amiri, O., Gholian-Jouybari, F., Dibaj, M., Akrami, M., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2023). Metaheuristic optimizers to solve multi-echelon sustainable fresh seafood supply chain network design problem: a case of shrimp products. *Alexandria Engineering Journal, 68*, 491–515. doi:https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.01.022

Mosallanezhad, B., Hajiaghaei-Keshteli, M., & Triki, C. (2021). Shrimp closed-loop supply chain network design. *Soft computing, 25*, 7399–7422.

Murugan, G., Ahilan, K., Prakasam, V. P., Malreddy, J., Benjakul, S., & Nagarajan, M. (2024). Fish Waste Composition and Classification. Dans *Fish Waste to Valuable Products* (pp. 1–26). Springer. doi:https://doi.org/10.1007/978-981-99-8593-7_1

Purnomo, M. R., Wangsa, I. D., Rizky, N., Jauhari, W. A., & Zahria, I. (2022). A multi-echelon fish closed-loop supply chain network problem with carbon emission and traceability. *Expert Systems with Applications, 210*, 118416. doi:https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118416

Quella, F., & Belli, F. (2013). Reuse of components and products-'qualified as good as new'. *Handbook of Sustainable Engineering. Springer Netherlands*, 409–426. doi:https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8939-8_42

Rajabi-Kafshgar, A., Gholian-Jouybari, F., Seyedi, I., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2023). Utilizing hybrid metaheuristic approach to design an agricultural closed-loop supply chain network. *Expert Systems with Applications, 217*, 119504. doi:https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119504

Reh, L. (2006). Challenges for process industries in recycling. *China Particuology, 4*, 47–59.

Sadeghi-Moghaddam, S., Hajiaghaei-Keshteli, M., & Mahmoodjanloo, M. (2019). New approaches in metaheuristics to solve the fixed charge transportation problem in a fuzzy environment. *Neural computing and applications, 31*, 477–497.

Stindt, D., & Sahamie, R. (2014). Review of research on closed loop supply chain management in the process industry. *Flexible Services and Manufacturing Journal, 26*, 268–293. doi:https://doi.org/10.1007/s10696-012-9137-4

Winkler, H. (2011). Closed-loop production systems—A sustainable supply chain approach. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 4*, 243–246. doi:https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2011.05.001

Yang, S., Ding, P., Wang, G., & Wu, X. (2020). Green investment in a supply chain based on price and quality competition. *Soft Computing, 24*, 2589–2608.

Yixuan, W., Ya, L., & Nuo, W. (2023). A GIS-based maritime supply chain network design of distant-water fisheries. *Computers and Electronics in Agriculture, 214*, 108321. doi:https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108321

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Traçabilité et performance dans l'affacturage : le rôle des graphes P-temporels et de la blockchain

ABDELHAK GUEZZI[1], THI LE HOA VO[1], EMMANUELLE FROMONT[1]

[1] UNIV. DE RENNES, IGR-IAE RENNES, CNRS, CREM – UMR6211
11 rue Jean Macé, 35700 Rennes, France
abdelhak.guezzi@univ-rennes.fr
thi-le-hoa.vo@univ-rennes.fr
emmanuelle.fromont@univ-rennes.fr

***Résumé* – L'affacturage, un mode de financement efficace des chaînes logistiques (Supply Chain Finance), permet aux entreprises d'optimiser leur trésorerie en cédant leurs créances. Il contribue à fluidifier les flux financiers et à réduire les risques de liquidité.**

La blockchain transforme l'affacturage en renforçant la traçabilité, la transparence et l'efficacité des flux financiers au sein de la chaîne. Elle permet à ses membres de suivre en temps réel chaque étape du processus financier.

En utilisant les graphes d'événements P-temporels (P-time Event Graphs), un outil puissant pour modéliser les systèmes à événements discrets (SED) avec des contraintes temporelles, particulièrement adaptés à des applications comme l'affacturage, cette étude s'intéresse à optimiser les processus financiers par la blockchain. De plus, le temps de cycle, durée moyenne pour compléter un cycle d'événement, est un indicateur clé de performance.

L'intégration de la blockchain et des graphes P-temporels améliore donc l'automatisation, réduit les coûts administratifs et énergétiques, et renforce la traçabilité. La modélisation basée sur des contraintes polyédriques ($A \cdot x \leq b$) permet d'analyser les performances et de minimiser les temps de cycle.

Cette synergie innovante propose des solutions durables pour optimiser les systèmes financiers et les chaînes logistiques, illustrant le potentiel des technologies avancées dans la transformation des services financiers.

***Mots clés* – Affacturage, Blockchain, Graphes d'évènements P-temporel, Temps de cycle, programmation linéaire.**

***Abstract* – Factoring, an efficient financing scheme of supply chains (SCF), enables businesses to optimize their cash flow by selling their receivables. This practice helps streamline financial flows and mitigate liquidity risks.**

Blockchain is transforming factoring by enhancing traceability, transparency, and financial flow efficiency within the chain. It enables members to track every step of the financial process in real time.

P-time Event Graphs (PTEGs) provide a powerful framework for modeling discrete event systems (DES) with temporal constraints, making them particularly suitable for applications such as factoring. The cycle time, the average time taken to complete an event cycle, is a key performance indicator. This study explores the use of PTEGs to optimize financial processes.

The findings shed light on the role of integrating blockchain and P-time Event Graphs to improve automation reduce administrative and energy costs, and strengthen traceability. The polyhedral constraint model ($A \cdot x \leq b$) enables performance analysis and cycle time minimization.

This innovative synergy offers sustainable solutions for optimizing financial systems and supply chains, highlighting the potential of advanced technologies in reshaping financial services.

***Keywords* – Factoring, Blockchain, P-time Event Graphs, Cycle Time, Linear Programming**

CIGI QUALITA MOSIM 2025

Barriers to the adoption of Circular Supply Chains in the context of Moroccan companies: A multi-case study

SALWA ASSEMLALI[1], MOHAMED SABAR[2]

[1] ISCAE
ISCAE Km 9,5 Route de Nouasseur BP 8114 Casablanca, Morocco
salwa.assemlali@gmail.com

[2] ISCAE
ISCAE Km 9,5 Route de Nouasseur BP 8114 Casablanca, Morocco
msabar@groupeiscae.ma

Résumé – L'économie circulaire vise à remplacer le modèle linéaire traditionnel par un modèle circulaire, respectueux de l'environnement. La Supply Chain circulaire, qui est régénérative et restaurative par design et par intention, améliore les dimensions économiques, environnementales et sociales. Cette recherche identifie les barrières à l'adoption des Supply Chains circulaires dans les entreprises marocaines et les relations de cause à effet entre ces barrières.

Une revue de littérature a identifié 28 barrières, regroupées en six catégories : financières, régulation, expertise et technologie, gouvernance, marché et infrastructures. La priorisation de ces barrières a été réalisée via les modèles DEMATEL et AHP, ainsi que via une approche qualitative avec Nvivo, sur six entreprises marocaines.

Les catégories de barrières principales sont liées à la régulation, aux finances et au marché. Deux barrières prépondérantes sont l'absence de gain économique à court terme et la pression insuffisante des consommateurs. Les relations identifiées montrent l'impact de l'absence de support gouvernemental sur le manque de politiques fiscales et la faible régulation environnementale, ainsi que l'impact du manque d'économie d'échelle sur l'absence de gain économique à court terme.

Les recherches futures pourraient explorer les facteurs favorisant l'implémentation de modèles circulaires et étendre l'étude à un échantillon plus large de l'économie marocaine.

Abstract – The circular economy aims to replace the traditional linear model with a circular one that is environmentally friendly. The Circular Supply Chain, which is regenerative and restorative by design and by intention, enhances economic, environmental, and social dimensions. This research identifies barriers to adopting circular Supply Chains in Moroccan companies and the cause-and-effect relationships between these barriers.

A literature review identified 28 barriers, grouped into six categories: financial, regulatory, expertise and technology, governance, market, and infrastructure. The prioritization of these barriers was done using DEMATEL and AHP models, along with a qualitative approach using Nvivo, on six Moroccan companies.

The main categories of barriers are related to regulation, finances, and the market. Two predominant barriers are the lack of short-term economic gain and insufficient consumer pressure. The identified relationships show the impact of the absence of government support on the lack of fiscal policies and weak environmental regulation, as well as the impact of the lack of economies of scale on the absence of short-term economic gain.

Future research could explore factors that favor the implementation of circular models and extend the study to a larger sample of the Moroccan economy.

Mots clés – **Economie circulaire, Supply Chain Management, Supply Chain circulaire, Barrières, Modèles d'aide à la décision multicritères**

Keywords – **Circular Economy, Supply Chain Management, Circular Supply Chain, Barriers, Multi-Criteria Decision Models**

1 INTRODUCTION

The Circular Economy traces its origins back to 1960 with Boulding (Lieder & Rashid, 2015), although its definition have only reached a consensus in the recent years. It is described in the literature as an alternative to the traditional Take – Make – Use – Dispose model (Stahel, 2016) aiming to reduce the consumption of natural resources. Thus, the Circular Economy is defined as a regenerative and restorative model by design and by intention (Bocken et al., 2017; Kirchherr et al., 2017; Tura et al., 2018).

On the other hand, the Supply Chain Management is a mature field that can be depicted as the management of information, physical and financial flows across the Supply Chain (Stadtler, 2014). It is defined as "the management of upstream and downstream relationships with suppliers and customers to deliver superior customer value at less cost to the supply chain as a whole" (De Angelis et al., 2018).

As Supply Chain Management is highlighted as the main vector to implementing a Circular Economy (Geissdoerfer et al., 2018), these two concepts were combined leading to the terminology of Circular Supply Chain, with the idea of applying circular thinking to Supply Chain Management (Farooque, Zhang, Thürer, et al., 2019; Khan & Ali, 2022).

An explicit definition of the Circular Supply Chain found in the literature is the one provided by Geissdoerfer et al. (2018), who describe the Circular Supply Chain as "as the configuration and coordination of the organizational functions

marketing, sales, R&D, production, logistics, IT, finance, and customer service within and across business units and organizations to close, slow, intensify, narrow, and dematerialize material and energy loops to minimize resource input into and waste and emission leakage out of the system, improve its operative effectiveness and efficiency and generate competitive advantages" (Geissdoerfer et al., 2018).

This combination main benefits lie on the triple bottom-line, with social, environmental, and economic impacts (Farooque, Zhang, Thürer, et al., 2019; Kirchherr et al., 2018; Lahane & Kant, 2021; Levering & Vos, 2019).

Few applications are described in the literature, which led several researchers to study the barriers to the adoption of circular models. Therefore, the current study aims to achieve the following objectives:

1) Map the barriers to the adoption of Circular Economy or Circular Supply Chains described in the literature.
2) Prioritize these barriers using a combination of two Multi-Criteria Decision Models through a multi-case study of six Moroccan companies, along with a qualitative approach.

This paper is organized as follows: Section 2 describes the outcomes of the literature review. Section 3 reviews the Multi-Criteria Decision Model and the selection of models adopted in this publication. Section 4 describes the methodology, and Section 5 presents the results of the multi-case study.

2 LITTERATURE REVIEW

2.1 Methodology adopted for the literature review

The research methodology used relies on a systematic literature review conducted using three main databases: Google Scholar, Web of Science and Science Direct.

The main keywords used in the literature review were: Circular Economy, Circular Supply Chain, Barriers.

The articles were selected based on the abstracts to only retain articles which objective is to provide an overview of barriers to the adoption of Circular Supply Chains and Circular models. The focus was also made on the articles published in the past 10 years.

The details of the literature review is described in the thesis publication (Assemlali, 2024).

2.2 Results of the literature review

The barriers to the adoption of circular supply chains cited in the literature are captured and clustered into six main categories. In a second step, the multi-criteria decision models are explored to select the most suitable one(s) to be applied in this case study for the prioritization of the barriers.

Six categories of barriers and 28 detailed barriers are identified through an extensive literature review. These barriers are listed in Table 1:

1	**Financial barriers**
1.1	Lack of financial resources (Farooque, Zhang, & Liu, 2019; Khandelwal & Barua, 2020; Vermunt et al., 2019)
1.2	Major upfront investment costs (Govindan & Hasanagic, 2018; Grasfstrom & Aasma, 2021; Kazancoglu et al., 2020; Khandelwal & Barua, 2020; Kumar et al., 2021; Ozkan-ozen et al., 2020; Vermunt et al., 2019)
1.3	Lack of economic benefits in the short-term (Govindan & Hasanagic, 2018; Khandelwal & Barua, 2020; Mangla et al., 2018; Ritzén & Sandström, 2017)
1.4	Uncertainty about benefits (Farooque, Zhang, & Liu, 2019; Grasfstrom & Aasma, 2021; Kazancoglu et al., 2020; Ozkan-ozen et al., 2020; Vermunt et al., 2019)
1.5	Lack of economies of scale (Farooque, Zhang, & Liu, 2019; Kazancoglu et al., 2020)
1.6	High costs of recycled or environmentally friendly materials (Govindan & Hasanagic, 2018; Grasfstrom & Aasma, 2021; Kazancoglu et al., 2020; Khandelwal & Barua, 2020; Vermunt et al., 2019)
1.7	High production / logistics costs (Govindan & Hasanagic, 2018; Vermunt et al., 2019)
2	**Regulation barriers**
2.1	Weak environmental regulation (Farooque, Zhang, & Liu, 2019; Govindan & Hasanagic, 2018; Khandelwal & Barua, 2020; Mangla et al., 2018; Ozkan-ozen et al., 2020; Vermunt et al., 2019)
2.2	Lack of preferential tax policies / incentives for promoting circular models (Govindan & Hasanagic, 2018; Grasfstrom & Aasma, 2021; Khandelwal & Barua, 2020; Mangla et al., 2018; Vermunt et al., 2019)
2.3	Lack of certifications / standards related to circular economy (Govindan & Hasanagic, 2018; Kazancoglu et al., 2020; Mangla et al., 2018; Vermunt et al., 2019)
2.4	Lack of governmental support (Kumar et al., 2019)
3	**Expertise and Technology barriers**
3.1	Limited expertise, technology and information / Lack of skilled workforce (Farooque, Zhang, & Liu, 2019; Govindan & Hasanagic, 2018; Kazancoglu et al., 2020; Khandelwal & Barua, 2020; Kumar et al., 2019; Mangla et al., 2018; Ozkan-ozen et al., 2020; Vermunt et al., 2019)
3.2	Difficulty for companies to manage product quality through the lifecycle (Govindan & Hasanagic, 2018; Kazancoglu et al., 2020; Khandelwal & Barua, 2020)
3.3	Design challenges to reuse and recovery products (Govindan & Hasanagic, 2018; Kazancoglu et al., 2020; Ritzén & Sandström, 2017; Vermunt et al., 2019)
3.4	Challenges to safe return to the biosphere (Govindan & Hasanagic, 2018)
4	**Governance barriers**
4.1	Unclear vision on how to apply Circular Economy in the Supply Chain field (Govindan & Hasanagic, 2018; Khandelwal & Barua, 2020; Mangla et al., 2018)
4.2	Higher priority given to other issues related to Supply Chain Management (Govindan & Hasanagic, 2018)
4.3	Resistance to change (Farooque, Zhang, & Liu, 2019; Grasfstrom & Aasma, 2021; Kazancoglu et al., 2020; Khandelwal & Barua, 2020; Kumar et al., 2021; Mangla et al., 2018; Vermunt et al., 2019)
4.4	Lack of a standard system for performance indicators (Govindan & Hasanagic, 2018; Kazancoglu et al., 2020; Khandelwal & Barua, 2020; Kumar et al., 2019)
4.5	Difficulty to measure the benefits of implementing a Circular Supply Chain (Ritzén & Sandström, 2017)
4.6	Lack of collaboration between supply chain actors and ecosystem (Farooque, Zhang, & Liu, 2019; Kazancoglu et al., 2020; Khandelwal & Barua, 2020; Mangla et al., 2018; Vermunt et al., 2019)
5	**Market barriers**
5.1	Lack of market preference / pressure from both customers and consumers (Farooque, Zhang, & Liu, 2019)
5.2	Challenges in determining a fair price for products (Govindan & Hasanagic, 2018)
5.3	Bad consumer perception towards reused products or

	components / Insufficient market demand (Govindan & Hasanagic, 2018; Khandelwal & Barua, 2020; Kumar et al., 2019; Mangla et al., 2018)
5.4	Lack of public awareness (Govindan & Hasanagic, 2018; Grasfstrom & Aasma, 2021; Kazancoglu et al., 2020; Khandelwal & Barua, 2020; Mangla et al., 2018; Vermunt et al., 2019)
6	**Infrastructure barriers**
6.1	Insufficiency of reverse logistics infrastructure / Insufficient collection centers (Kazancoglu et al., 2020; Khandelwal & Barua, 2020; Kumar et al., 2021)
6.2	Inadequate facility infrastructure (Kazancoglu et al., 2020; Kumar et al., 2021)
6.3	Complexity of collection and separation processes (Govindan & Hasanagic, 2018; Kazancoglu et al., 2020; Vermunt et al., 2019)

Table 1. Barriers to the adoption of Circular Supply Chains

3 MULTI-CRITERIA DECISION MODELS

The economic ecosystem's complexity is increasingly growing leading to decision making becoming a critical matter for companies (Habiba & Ashgar, 2009).
Multi-Criteria Decision Models (MCDM) are defined as models that support a decision maker into identifying an optimal solution. It is a discipline that is at the intersection of several domains (Ishikaza & Nemery, 2013).
There are four main types of problems that rely on MCDM: choice problems (selecting the optimal option among several alternatives), sorting problems (grouping alternatives into clusters), ranking problems (ranking several alternatives from the best to the worst option), and description problems (describing the possible options and identifying their consequences) (Ishikaza & Nemery, 2013).

A MCDM relies on three main elements: the objective of the problem, the alternatives, and the criteria. There are several types of MCDM, the most renown ones being: Analytical Hierarchy Process (AHP), ELECTRE, TOPSIS, Analytical Network Process (ANP), DEMATEL (Aruldoss et al., 2013).
We will describe in the following the two models that were selected for this publication: Analytical Hierarchy Process (AHP) and Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL).

Analytical Hierarchy Process (AHP)
AHP method is a ranking model. Developed by Saaty, it is one of the most cited and used methods (Gavade, 2014).
This model can only be used with problems with independent criteria: there should be no influence between the criteria when using an AHP model (Ishikaza & Nemery, 2013). This method relies on structuring a problem hierarchically (Aruldoss et al., 2013; Gavade, 2014; Triantaphyllou, 2000).

DEcision Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL)
This method relies on the identification of all the cause-effect interactions in the context of complex systems (Si et al., 2018). Hence, it is fitted to problems with dependent relations.
Moreover, one of the key advantages of DEMATEL is that it provides a visual outcome of the cause-effect relationship existing for a certain problem (Chen et al., 2021).

These two models were selected among the variety of existing models as they are fitted to a context where the criteria are independent. While the alternatives (barriers) are dependent, the criteria (Moroccan companies) are independent. Moreover, these two models allow identifying the causal relationships between the alternatives. Finally, DEMATEL provides a visual representation of the cause-effect relationships.
The application of these two models follows a structured approach as described in Figure 1.

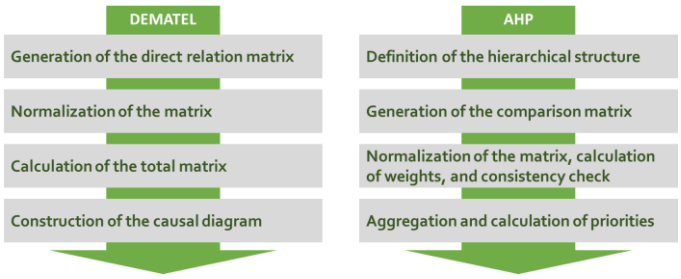


Figure 1. Steps for the application of DEMATEL and AHP models

The steps described in Figure 1 are followed in the case study application.

4 METHODOLOGY

The methodology adopted in this publication focuses on the application of DEMATEL and AHP on the one hand, and on a qualitative approach on the other hand.

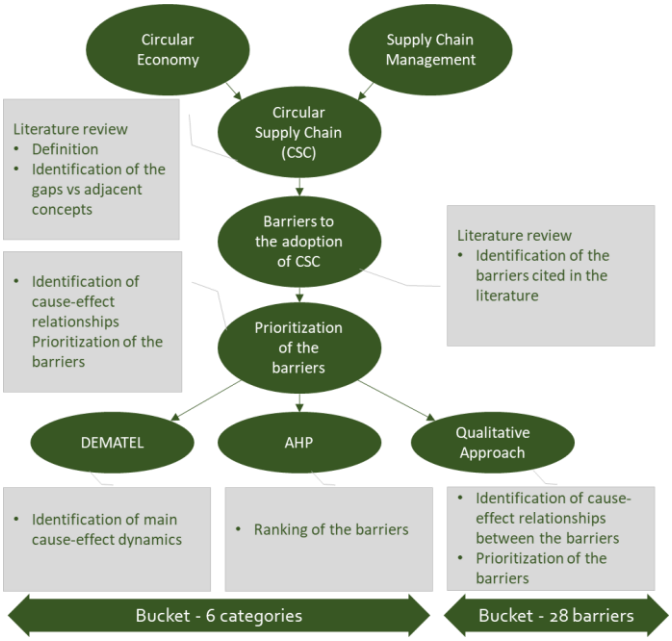


Figure 2. Overall methodology

DEMATEL and AHP are applied at the category bucket (financial, regulation, expertise and technology, governance, market, infrastructure), while the qualitative approach is applied at the bucket of the categories and the 28 detailed barriers. The application of DEMATEL and AHP is limited to the categories of barriers due to the complexity of applying them at the detailed level, caused by the high number of possible combinations.
This allows confronting the results of each approach and complementing the MDCM application with a qualitative approach.
The application of DEMATEL and AHP uses Saaty scale (1 to

9). While DEMATEL usually uses a scale from 1 to 4, it is chosen to apply the same scale in the application of DEMATEL and AHP to benefit from a homogeneity of the exploitation of the data collected.
The qualitative approach is applied using Nvivo for the exploitation of the data collected.
The methodology relies on a multi-case study: six Moroccan companies are included in the study, and for each, a semi-structured interview is conducted.

Case	Description
1	Subsidiary of a French multinational corporation Business sector: FMCG - Dairy Local manufacturing Revenue: approx. 400 M€ 4 000 employees 4 factories; ~20 distribution centers; 1 dairy farm
2	Subsidiary of a French multinational corporation Business sector: Dairy and Specialized nutrition Dual Supply Chain with local production and imported products Revenue ~ 5 billion €
3	Moroccan company Business sector: intellectual services - consulting in logistics and Supply Chain Main clients' business sector: Industry, Distribution & Services
4	Moroccan company Business industry: Food industry – frozen products Revenue: approx. 20 M€ 1 factory; 2 farms
5	Subsidiary of an American multinational corporation Business sector: FMCG – Industrial bakery Revenue: approx. 150 M€ 500 employees excluding distribution (outsourced) 1 factory
6	Moroccan company Business sector: intellectual services - consulting (financial communication strategy, CSR strategy, executive consulting) Revenue not disclosed

Table 2. Description of the cases

This multi-case study is an exploratory study. Therefore, there are limitations in terms of representativeness among the six selected companies. This study does not aim to provide sector-specific challenges, which can be addressed in further research.
The questionnaire was structured into five sections:

- Part 1: General information related to the company and the interviewee (industry sector, role of the interviewee, seniority, revenue of the company, number of industrial / logistics sites)
- Part 2: Level of awareness of the interviewee on Circular Economy and Circular Supply Chains (has the interviewee heard about these concepts? What is his/her definition of these concepts? What does he/she think about these concepts? How are they currently applied within their company?
- Part 3: Barriers to the adoption of circular models identified by the respondent (according to the interviewee, what are the three main barriers in the Moroccan context and within the company they belong to?)
- Part 4: The respondent is exposed to the six categories of barriers. He/She is asked to perform a peer-comparison using Saaty scale and to identify the causal relationships between the categories of barriers
- Part 5: The respondent is exposed to the 28 barriers framework, separately for each category of barriers. He/She is asked to identify the key barriers and the causal relationships existing between the barriers within a category.

The detailed questionnaire can be found in the thesis publication (Assemlali, 2024).

5 RESULTS OF THE CASE STUDY

5.1 Application of DEMATEL

The application of DEMATEL follows the steps described in Figure 1.

Mathematical Formulation of the DEMATEL Method
Step 1: Construction of the Direct-Relation Matrix
For each case studied, a matrix is constructed based on the evaluations made by each respondent on the influence links of each barrier with respect to the other barriers using Saaty's scale (1984):

- 1: Equal importance of the two elements
- 3: One element is slightly more important than the other
- 5: One element is more important than the other
- 7: One element is much more important than the other
- 9: One element is absolutely more important than the other

The opposite influences are evaluated by the inverse of the value estimated by the respondent. For example, if a respondent evaluates the importance of barrier A with respect to barrier B as 3 (barrier A is slightly more important than barrier B), then the influence of barrier B on barrier A is equal to 1/3.
This allows for the construction of a matrix as follows for each case studied:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{i6} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{6j} & \cdots & a_{ij} \end{bmatrix}$$

i=1 to 6 ; j=1 to 6

a_{ij} **represents the influence of barrier i on barrier j.** The diagonal values in the case of DEMATEL are zero. All cases are aggregated into a single matrix through an average of the matrices of each of the six cases studied. This matrix will be named matrix A.
Step 2: Normalization of the Matrix First, K is calculated according to the following formula:

$$K_i = \sum_{j=1}^{6} a_{ij}$$

K(i) corresponds to the sum of each row of the matrix. Then, K is calculated, which corresponds to the maximum of the values K_i.

For each case, the matrix is then normalized according to the following formula:

$$X = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{K} & \cdots & \frac{a_{i6}}{K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{a_{6j}}{K} & \cdots & \frac{a_{ij}}{K} \end{bmatrix}$$

i=1 to 6 ; j=1 to 6

Step 3: Calculation of the Total-Relation Matrix The total-relation matrix is calculated according to the following formula:

$$T = X\,(I - X)^{-1}$$

Where I represents the Identity matrix.

Step 4: Construction of the Causal Diagram For each row and each column, the cumulative influences are calculated as follows:

$$D_i = \sum_{j=1}^{6} a_{ij}$$

And

$$R_j = \sum_{i=1}^{6} a_{ij}$$

For the construction of the DEMATEL causal diagram, we calculate for each barrier:

- D-R or net causal value, which represents the type of relationship characterizing the barrier: thus, a positive D-R value indicates that the barrier belongs to the group of causes; a negative value means that the barrier belongs to the group of effects.
- D+R or importance value, which represents the intensity of the relationships of a barrier with respect to other barriers: thus, the higher the value, the more it implies that the barrier has many relationships with other barriers.

We obtain through the application of DEMATEL the following causal diagram in Figure 3.

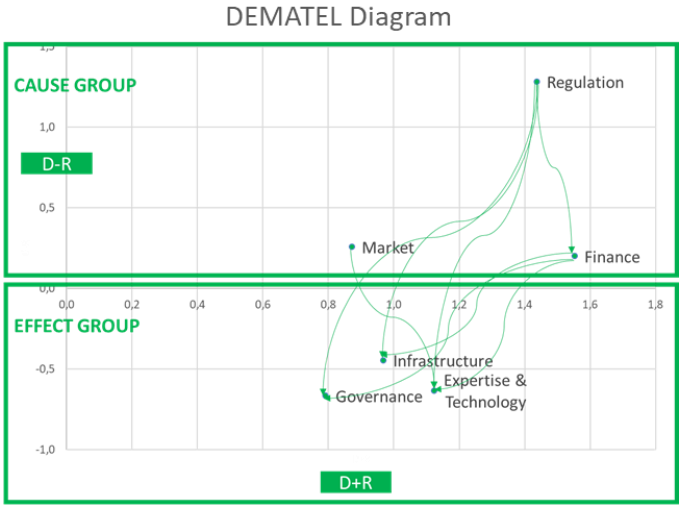


Figure 3. DEMATEL Results

The application of DEMATEL shows that the financial barriers are those that have the most relationships with other barriers. Furthermore, regulatory barriers have the highest net causal value, and this value is significantly higher than other categories of barriers. Finally, the categories of financial barriers, regulatory barriers, and market-related barriers are part of the group of causes.

5.2 Application of AHP

The application of AHP follows the steps described in Figure 1.

Mathematical Formulation of the AHP Method

The AHP method is among the most widespread methods in the literature and is considered a simple and flexible method (Saroha et al., 2019).

Step 1: Definition of the Network Structure

The AHP method involves defining three distinct notions: the notion of objective, criteria, and alternatives. It is based on a hierarchical structure and requires a minimum of three levels (Ishikaza & Nemery, 2013).

In the context of this research, the objective is the identification of priority barriers. For this, the criteria in the AHP method will be defined in the problem as follows:

- The first criterion will be the typology of companies, which in the context of this research, can be reduced to two types of occurrences: a multinational or a Small and Medium Enterprise (SME).
- The second criterion is based on the company's sector of activity. In this case, there are two types of sectors represented: the industrial sector and the intellectual services sector.

In the case of this research, the two criteria are considered with the same weight. This is justified by the very essence of the research question, which generally deals with the case of Moroccan companies, regardless of their typology and sector of activity. Thus, in the following, both the criteria and the cases of companies will be considered equivalent and therefore of the same weight. As for the alternatives, these correspond to the six categories of barriers studied.

Step 2: Construction of the Pairwise Comparison Matrix

The following approach is applied progressively for the criteria first, then for the alternatives for a given criterion. The different criteria and the different cases studied are considered equivalent; therefore, the weight of each case and each criterion is considered identical. The creation of the pairwise comparison matrix for each case is based on the formula below, which allows it to be normalized, using the same source data as those used for the application of DEMATEL:

$$X = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{\sum_{j=1}^{6} a_{ij}} & \cdots & \frac{a_{i6}}{\sum_{i=1}^{6} a_{ij}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{a_{6j}}{\sum_{j=1}^{6} a_{ij}} & \cdots & \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^{6} a_{ij}} \end{bmatrix}$$

Thus, for each case studied and for each barrier, a weight is calculated according to the following formula:

$W_i = Average(a_{ij})$ for j = 1 to 6 and for each of the cases

Step 3: Consistency Check for Each Case
An optional step in the application of the AHP method is the consistency check, to ensure the reliability of the results. From matrices A and X, the values T(i) and then Lambda_Max are calculated as follows:

$$T_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} A_{ij}}{Average\ (T_{ij})}$$

$$Lamba_{Max} = Max(T_i)$$

From this, two indicators are calculated. The consistency index (CI) is based on the following formula:

$$CI = \frac{Lamba_{Max} - n}{n - 1}$$

Where n represents the number of cases compared (in this research, n=6). The consistency ratio (CR) is based on the following formula:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

The RI values are relative to the number of cases compared (n) as described by Saaty (1977).

n	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1,41	1.45	1.49

A CR value less than 0.1 means that the results are reasonably consistent.

Step 4: Aggregation of All Cases
The aggregation of all cases is carried out through the compilation of all W(i) values for each case. These values are applied to the weights of each case or criteria, here considered equivalent. The total weight of each alternative corresponds to the sum of the W(i) values weighted by the weight of each case. This calculation allows for the ranking of alternatives from the most important to the least important.

We obtain through the application of AHP the following graph.

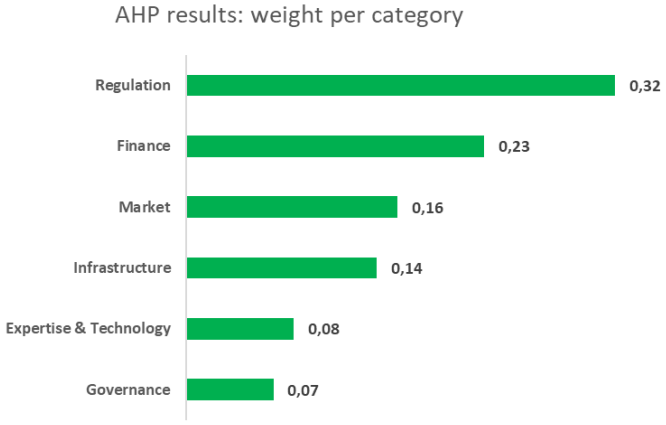


Figure 4. AHP Results

The prioritization of barrier categories shows that the order of importance of barriers is as follows: regulatory barriers, then financial barriers, then market-related barriers. Furthermore, infrastructure-related barriers are of almost equal importance to market-related barriers.

For further details, the intermediate results are described in the thesis publication (Assemlali, 2024).

5.3 Qualitative approach

At the level of barrier categories, financial barriers and regulatory barriers are most often identified as important for the cases studied. Furthermore, at the level of detailed barriers, two barriers stand out from the qualitative analysis: the first belongs to the category of financial barriers (lack of short-term gain) and the second to the category of market-related barriers (insufficient pressure and preference from consumers and end customers). Thus, although the category of market-related barriers does not stand out in the macroscopic analysis, it does in the microscopic analysis. This indicates a secondary importance of market-related barriers, which should not be overlooked in the case of the Moroccan companies studied.
Finally, at the microscopic level, the analysis of cause-and-effect relationships shows that the three predominant relationships emerging from the qualitative analysis are linked to barriers belonging either to the category of financial barriers or to the category of regulatory barriers. Two of these relationships are exclusively related to regulatory barriers, which seems to demonstrate a higher importance given by respondents to this category of barrier.

Approach	Key findings
Nvivio – Barriers' prioritization	<u>Barrier category level</u> Regulatory barriers and financial barriers are the most frequently cited barriers by respondents. <u>Detailed barrier level</u> In order of importance, the most significant barriers are first the lack of short-term economic gain (financial barrier), followed by insufficient preference and pressure from consumers and end customers (market-related barrier).
Nvivo – Cause-effect relationships	<u>Barrier category level</u> - Expertise and Technology → Finance - Regulation → Expertise and Technology - Regulation → Infrastructure <u>Detail barrier level</u> - Lack of economy of scale → Lack of economic benefits in the short-term - Lack of governmental support → Lack of preferential tax policies / incentives for promoting circular models - Lack of governmental support → Weak environmental regulation

Table 3. Summary of the qualitative analysis results

5.4 Summary of the results of the multi-case study

The comparison of the results from the approach based on DEMATEL and AHP and the qualitative approach shows points of convergence and some points of divergence.
The main point of convergence is the predominance of regulatory barriers. Regardless of the approach or method applied, this category of barriers indeed stands out as predominant.
As for financial barriers, they are not highlighted in the first position but remain among the predominant barriers in both

approaches: the qualitative approach and the approach based on the application of DEMATEL and AHP.

Moreover, there is a body of evidence that seems to show, although it is not entirely conclusive, the importance of market-related barriers. Indeed, the DEMATEL and AHP methods place them in third position. However, the qualitative analysis does not highlight market-related barriers at the level of barrier categories. Nevertheless, at the microscopic level, the qualitative analysis shows the importance of the barrier related to insufficient preference and pressure from consumers and end customers, which is part of the market-related barriers. These gaps between the macro and micro approach can be further explored in future research through an approach where the barriers are prioritized as a whole and not separately by category, which can raise a bias in the evaluation by the respondents. The conclusions seem consistent with the market context and in an economic and social environment that is still not very aware of environmental issues and, by extension, issues related to the circular economy.

The lack of short-term economic gain is also clearly identified as a priority barrier.

Regarding the analysis of cause-and-effect relationships, the results of the qualitative analysis are consistent with the analysis based on DEMATEL and AHP, namely that regulatory barriers are the most important "cause" barriers.

This is confirmed even at the detailed level, as the lack of government support is mostly cited as a cause of barriers related to the lack of fiscal policies and incentives, as well as the barrier related to weak regulation.

6 CONCLUSION

The comparison of the results from these two approaches reveals three main conclusions.

Firstly, regulatory barriers are identified as predominant regardless of the approach or method applied. This is confirmed even at the detailed level, as the lack of government support is mostly cited as a cause of barriers related to the lack of fiscal policies and incentives, as well as the barrier related to weak regulation.

Secondly, financial barriers rank second among the predominant barriers in both applied approaches. The lack of short-term economic gain is identified as a priority barrier at the detailed level.

Finally, market-related barriers rank third, which is confirmed by the qualitative approach that identifies insufficient preference and pressure from consumers and end customers as the predominant market-related barrier.

These results align with the findings of Farooque et al. (2019). Their publication identifies eight barriers in the context of China and the food industry and relies on a scope of 105 responses collected for different type of Chinese Supply Chain stakeholders. It applies DEMATEL model to prioritize these barriers. Their results conclude that the regulatory barriers are predominant in the context of China and the food industry. However, they differ in the predominance of market-related barriers in the case of China, whereas financial barriers are predominant in the case of Moroccan companies.

In terms of research perspectives, four main areas can be explored in future research. While the present research focuses on barriers, future research could also investigate factors that, on the contrary, favor the implementation of circular models, to determine relevant and effective strategies to accelerate the circular transition in the case of Moroccan companies.

Moreover, the cases addressed could be extended to institutional actors, especially given the predominance of regulatory barriers. One of the limitations of this study is its limited generalizability, which could be addressed in future research by including a broader sample of companies and expanding the geographical scope beyond what was used in this study.

Finally, the application of multi-criteria decision-making methods other than DEMATEL and AHP could then be explored. The application of these methods could be carried out at the level of sub-barriers and not only at the level of barrier categories to ensure more reliable and accurate results.

7 REFERENCES

Aruldoss, M., Lakshmi, T. M., & Venkatesan, V. P. (2013). A Survey on Multi Criteria Decision Making Methods and Its Applications. *American Journal of Information Systems*, *1*(1), 31–43. https://doi.org/10.12691/ajis-1-1-5

Assemlali, S. (2024). *Évaluation et priorisation des barrières à l'adoption de Supply Chains circulaires dans le contexte d'entreprises marocaines : Une approche d'aide à la décision multicritères* (Thèse de doctorat, ISCAE)

Bocken, N. M. P., Olivetti, E. A., Cullen, J. M., Potting, J., & Lifset, R. (2017). Taking the Circularity to the Next Level A Special Issue on the Circular Economy. *Journal Of Industrial Ecology*, *00*(0), 1–7. https://doi.org/10.1111/jiec.12606

Chen, W. K., Nalluri, V., Hung, H. C., Chang, M. C., & Lin, C. T. (2021). Apply DEMATEL to analyzing key barriers to implementing the circular economy: An application for the textile sector. *Applied Sciences (Switzerland)*, *11*(3335). https://doi.org/10.3390/app11083335

De Angelis, R., Howard, M., & Miemczyk, J. (2018). Supply Chain management and the circular economy: towards the circular supply chain. *Production Planning & Control*, *29*, 425–437. https://doi.org/https://doi.org/10.1080/09537287.2018.1449244

Farooque, M., Zhang, A., & Liu, Y. (2019). Barriers to circular food supply chains in China. *Supply Chain Management: An International Journal*, *5*(24), 677–696. https://doi.org/10.1108/SCM-10-2018-0345

Farooque, M., Zhang, A., Thürer, M., Qu, T., & Huisingh, D. (2019). Circular supply chain management: A definition and structured literature review. *Journal of Cleaner Production*, *228*, 882–900. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.303

Gavade, R. K. (2014). Multi-Criteria Decision Making : An overview of different selection problems and methods. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, *5*(4), 5643–5646.

Geissdoerfer, M., Morioka, S. N., Monteiro De Carvalho, M., Evans, S., de Carvalho, M. M., & Evans, S. (2018). Business models and supply chains for the circular economy. *Journal of Cleaner Production*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.159

Govindan, K., & Hasanagic, M. (2018). A systematic review on drivers, barriers, and practices towards circular economy: a supply chain perspective. *International Journal of Production Research*, *56*(1–2), 278–311. https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1402141

Grasfstrom, J., & Aasma, S. (2021). Breaking circular economy barriers. *Journal of Cleaner Production*, *292*.

https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126002
Habiba, U., & Ashgar, S. (2009). A Survey on Multi-Criteria Decision Making Approaches. *International Conference on Emerging Technologies, A*, 321–325.
Ishikaza, & Nemery. (2013). *Multi-Criteria Decision Analysis*.
Kazancoglu, I., Kazancoglu, Y., Kahraman, A., & Yarimoglu, E. (2020). Investigating barriers to circular supply chain in the textile industry from Stakeholders ' perspective. *International Journal of Logistics: Research and Applications*, *0*(0), 1–28. https://doi.org/10.1080/13675567.2020.1846694
Khan, F., & Ali, Y. (2022). Implementation of the circular supply chain management in the pharmaceutical industry. *Environment, Development and Sustainability*, *24*(12), 13705–13731. https://doi.org/10.1007/s10668-021-02007-6
Khandelwal, C., & Barua. (2020). Prioritizing Circular Supply Chain Management Barriers Using Fuzzy AHP : Case of the Indian Plastic Industry. *Global Business Review*. https://doi.org/10.1177/0972150920948818
Kirchherr, J., Piscicelli, L., Bour, R., Kostense-smit, E., Muller, J., Huibrechtse-Truijens, A., & Hekkert, M. (2018). Barriers to the Circular Economy: Evidence From the European Union (EU). *Ecological Economics*, *150*(December 2017), 264–272. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.028
Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, *127*(September), 221–232. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005
Kumar, P., Kr, R., & Kumar, V. (2021). Managing supply chains for sustainable operations in the era of Industry 4.0 and circular economy: Analysis of barriers. *Resources, Conservation & Recycling*, *164* (January 2021), 105215. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105215
Kumar, Sezersan, Garza-reyes, J. A., Gonzalez, & Al-Shboul. (2019). Circular economy in the manufacturing sector: benefits, opportunities and barriers. *Management Decision*. https://doi.org/10.1108/MD-09-2018-1070
Lahane, S., & Kant, R. (2021). Evaluation and ranking of solutions to mitigate circular supply chain risks. *Sustainable Production and Consumption*, *27*, 753–773. https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.01.034
Levering, R., & Vos, B. (2019). Organizational Drivers and Barriers to Circular Supply Chain Operations. *Operations Management and Sustainability*, 43–66. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93212-5
Lieder, M., & Rashid, A. (2015). Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.042
Mangla, Luthra, Mishra, Singh, Rana, Dora, & Dwivedi. (2018). Barriers to effective CSCM in developing country context. *Production Planning & Control*. https://doi.org/10.1080/09537287.2018.1449265
Ozkan-ozen, Y. D., Kazancoglu, Y., & Mangla, S. K. (2020). Synchronized barriers for Circular Supply Chains in Industry 3.5 / Industry 4.0 transition for sustainable resource management. *Resources, Conservation & Recycling*, *161*(December 2019), 104986. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104986
Ritzén, S., & Sandström, G. Ö. (2017). Barriers to the Circular Economy – integration of perspectives and domains. *9th CIRP IPSS Conference: Circular Perspectives on Product/Service-Systems*, *64*, 7–12. https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.005
Si, S. L., You, X. Y., Liu, H. C., & Zhang, P. (2018). DEMATEL Technique: A Systematic Review of the State-of-the-Art Literature on Methodologies and Applications. *Mathematical Problems in Engineering*, *2018*(1). https://doi.org/10.1155/2018/3696457
Stadtler, H. (2014). Supply Chain Management : An Overview. *Supply chain management and advanced planning: Concepts, models, software and case studies*, (pp. 3–28). https://doi.org/10.1007/978-3-642-55309-7
Stahel, W. R. (2016). Circular economy. *Nature*, *531*(6), 435–438. https://doi.org/10.52899/978-5-88303-634-6_166
Triantaphyllou, E. (2000). *Multi-Criteria Decision Making Methods*. *Chapter 2*, 5–21.
Tura, N., Hanski, J., Ahola, T., Piiparinen, S., Hanski, J., Ahola, T., Piiparinen, S., & Valkokari, P. (2018). Unlocking circular business: a framework of barriers and drivers. *Journal of Cleaner Production.* https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.202
Vermunt, D. A., Negro, S. O., Verweij, P. A., Kuppens, D. V, & Hekkert, M. P. (2019). Exploring barriers to implementing different circular business models. *Journal of Cleaner Production*, *222*, 891–902. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.052

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Approche d'estimation spatiale de résidus pour l'approvisionnement d'un réseau logistique circulaire : cas d'étude en viabilité hivernale

NASSIF FERJANI[1], JEAN-FRANÇOIS AUDY[1,2], NEILA EL ASLI[1]

[1]Université du Québec à Trois-Rivières
Trois-Rivières, Québec, G8Z 4M3, Canada
nassif.ferjani@uqtr.ca; jean-francois.audy@uqtr.ca; neila.el.asli@uqtr.ca
[2]Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport (CIRRELT), Montréal, Québec, Canada

Résumé – Ce projet contribue à la mise en œuvre d'une pratique d'économie circulaire visant le réemploi en abrasifs d'hiver des résidus de balayures de rues printanières émis par les administrations routières assurant la viabilité hivernale du réseau routier. L'information sur la distribution spatiale des quantités de résidus à mobiliser pour l'approvisionnement d'un système circulaire est un prérequis à la conception d'un réseau logistique en boucle fermée entre ces émetteurs-preneurs (administrations routières), Cette publication présente la première approche d'estimation spatiale des résidus à circulariser en recourant aux données d'infrastructures du réseau routier sous la responsabilité de chaque administration routière ainsi qu'une analyse géospatiale par pixélisation. L'approche est ensuite démontrée sur un cas d'étude d'envergure impliquant 810 administrations routières et un territoire de 123 555 km2 au Québec, Canada.

Abstract – This project contributes to the implementation of a circular economy practice aimed at reusing as winter abrasives spring street sweeping residues generated by road administrations ensuring the winter maintenance of their road network. Information on the spatial distribution of the quantities of residues to be mobilized for the supply of a circular system is a prerequisite for designing a closed-loop logistics network between these emitters-takers (road administrations). This publication presents the first approach for spatial estimation of residues to be circularized by using road network infrastructure data under the responsibility of each road administration as well as geospatial analysis through pixilation. The approach is then demonstrated through a large-scale case study involving 810 road administrations and a territory of 123,555 km² in Quebec, Canada.

***Mots clés* – Chaîne d'approvisionnement en boucle fermée, estimation d'approvisionnement, analyse géospatiale, pixélisation, viabilité hivernale**
***Keywords* – Closed-loop supply chain, supply assessment, geospatial analysis, pixelization, winter maintenance**

Introduction :

L'économie circulaire vise à maximiser l'utilisation des ressources en réduisant le gaspillage et en intégrant les résidus dans des cycles de valorisation durables (Prieto-Sandoval et al., 2018). Ces résidus, principalement composés de sel, sable et de gravier, sont générés par les activités de viabilité hivernale, durant lesquelles les administrations routières épandent des abrasifs sur les routes afin d'assurer la sécurité et la praticabilité du réseau en améliorant l'adhérence des véhicules et des piétons. À la fin de l'hiver, ces abrasifs accumulés sur les chaussées sont collectés par des opérations de balayage, générant ainsi les « balayures de rues ». Dans le cadre de la viabilité hivernale, elle permet de recycler les balayures de rues en abrasifs d'hiver, limitant ainsi leur enfouissement et réduisant l'exploitation de ressources vierges. Toutefois, la mise en place d'un réseau logistique circulaire efficace repose sur une compréhension précise des flux de résidus et de leur répartition spatiale, un aspect encore peu exploré.

Les stratégies d'économie circulaire appliquées à la gestion des résidus issus de la viabilité hivernale d'un réseau routier connaissent un intérêt croissant, notamment en ce qui concerne la logistique de collecte des balayures de rues (Kraiem et al., 2024; Ben Daya et al., 2024) que leurs réemploi (Blouin et al., 2022; Blouin and Audy, 2023). Cette matière résiduelle printanière peut être valorisée via sa réintégration en abrasifs d'hiver (i.e., du gravier et sable épandus sur le réseau routier pour améliorer l'adhérence d'un véhicule/piéton) lors de la saison subséquente, réduisant ainsi l'enfouissement tout comme l'extraction de ressources minérales vierges non-renouvelables. Cependant, la conception du réseau logistique sous-jacent à la mise en place d'une initiative circulaire à l'échelle d'un territoire requière une compréhension fine des sources d'approvisionnement en résidus (i.e., à la fois les quantités générées que de leurs distribution spatiale), ce qui constitue actuellement une lacune. En effet, bien que certaines études aient démontré la faisabilité technique et économique de cette approche circulaire, elles demeurent à l'échelle d'un territoire limité avec une (Blouin et al., 2022) et deux (Hematian et al., 2024) administrations routières où ces dernières peinent à établir un portrait clair des quantités de balayures qu'elle génère sur leur réseau routier. Ainsi, l'absence d'une approche

d'estimation spatiale de ces résidus demeure un verrou à la généralisation de cette stratégie d'économie circulaire à l'échelle territoriale d'un vaste réseau logistique circulaire regroupant des centaines d'administrations routières.
Les administrations routières assurent la viabilité hivernale de leur réseau routier. Elles sont responsables de la bonne gestion environnementale des balayures de rues en passant par la collecte, le transport, le stockage, la disposition (enfouissement) et, suivant la mise en place d'une initiative circulaire, le traitement des balayures pour combler des besoins internes des administrations routières sur deux débouchés : comme intrant dans la fabrication d'abrasifs d'hiver et comme matériaux de construction dans les infrastructures routières. Cette gestion repose sur des flux de matières entre différents sites avec des fonctions distinctes tel qu'illustré sur la figure 1 et qui doivent coordonner leurs efforts afin d'assurer une gestion plus durable des balayures. Le lecteur peut se référer à Blouin et al. (2022) pour plus de détails.

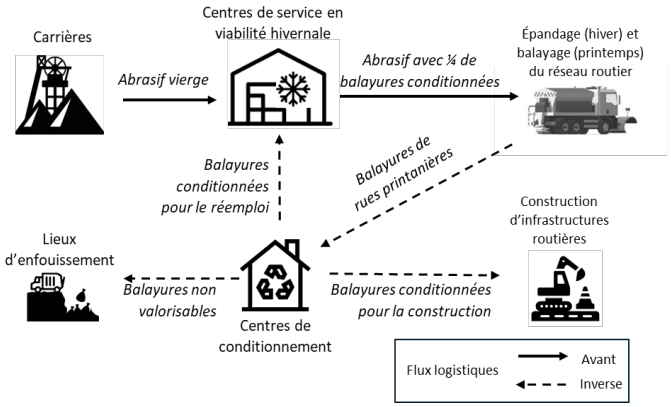


Figure 1. Réseau logistique circulaire à concevoir (adaptée de Hematian et al., 2024)

L'un des enjeux d'opérationnalisation de cette stratégie d'économie circulaire réside dans l'absence de données de qualité sur les quantités générées chaque année, ce qui rend hasardeux la conception d'un réseau logistique en boucle fermée entre les administrations routières émettrices-preneurs. Avec l'absence d'un cadre structuré d'estimation spatiale de ces résidus, les administrations doivent se fier à des données historiques partielles et limitées si ce n'est que des estimations sommaires à partir d'hypothèses générales.

Dans le cadre de cette publication, un cas d'étude d'envergure dans la partie sud du Québec, Canada est utilisé pour fin de démonstration d'une approche généralisable pour l'estimation spatiale des quantités de balayures de rues. Dans cette approche, la quantité est inférée à partir des caractéristiques du réseau routier. Les infrastructures routières, dont celles du Québec, présentent une importante diversité. Le réseau routier local, sous gestion d'autorités locales et désigné par municipalité au Québec, est souvent situé en milieux urbains denses tandis que le réseau routier supérieur, sous gestion d'autorités régionales du gouvernent national et désigné par centre de service au Québec, assure une connexion entre les municipalités et des zones éloignées, comme on peut l'observer dans la figure 2.

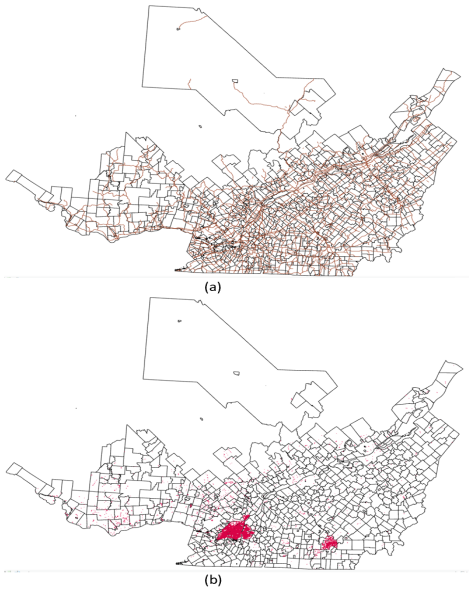


Figure 2.Réseau routier supérieur (a) et locale (b) dans le périmètre du cas d'étude

Une approche est proposée pour estimer la répartition des quantités de balayures collectées à l'échelle d'une unité spatiale spécifique (i.e., un territoire au périmètre spécifique), tout en prenant en compte les caractéristiques du réseau routier et l'administration routière responsable de sa gestion. Cette modélisation spatiale permet de bien structurer les données géographiques afin de tracer les flux de matière et assurer lors de la conception du réseau logistique une allocation optimale des quantités de résidus entre chaque unité spatiale et centre de traitement.

Cependant, les approches traditionnelles de modélisation spatiale, basées sur des unités administratives, ont des limites importantes. Ces méthodes souffrent du problème des unités spatiales modifiables (MAUP). Ce biais apparaît lorsque les résultats d'une analyse changent selon la taille ou la forme des zones géographiques utilisées. Ce phénomène peut engendrer des distorsions importantes, masquant des disparités locales essentielles à une prise de décision éclairée (Batista et al., 2013). De plus, la complexité dans la répartition des routes entre les régions renforce le besoin d'une méthode plus simple et uniforme

Afin de surmonter ces défis, cette étude propose une approche basée sur la pixellisation. En segmentant le territoire en cellules homogènes, cette méthode permet une meilleure représentation des disparités spatiales et offre une analyse plus fine de la distribution des résidus routiers. Penížek et al. (2016) ont démontré que l'utilisation de grilles régulières améliore considérablement la distribution et la précision des analyses spatiales tout en réduisant les distorsions géographiques. Cependant, l'efficacité des modèles d'estimation spatiale dépend fortement de la résolution des données utilisées. La taille des pixels est un facteur clé qui influence directement la qualité des résultats obtenus. Si des résolutions plus fines permettent d'améliorer la granularité dans les prévisions, elles entrainent également des exigences computationnelles accrues et un besoin de stockage plus important.

De plus, une approche par pixellisation offre une meilleure représentation des coûts de transport et des flux logistiques (Barry et Bush, 2012), lors de la conception du réseau logistique, soit l'optimisation des décisions d'allocation entre

chaque pixel et les sites de demande (e.g., usines, entrepôts). En adoptant cette approche, la conception d'un réseau logistique en boucle fermée entre ces émetteurs-preneurs devient possible. Cette publication est structurée en quatre sections. Premièrement, la méthodologie avec le modèle proposé pour l'approche d'estimation est présenté suivi d'un survol du cas d'étude. Les résultats d'application de l'approche sur le cas d'étude sont ensuite présentés et discutés suivi d'une conclusion.

Méthodologie

La méthodologie adoptée repose sur une approche générique et systématique, combinant des outils d'analyse spatiale et des techniques de gestion des données géographiques pour modéliser et estimer les quantités de balayures. Cette approche s'appuie sur l'utilisation d'un système d'information géographique (SIG) qui facilitent l'intégration et l'analyse des données spatiales essentielles à la structuration d'un réseau logistique circulaire. Barry et Bush (2012) soulignent que l'intégration des SIG dans la gestion logistique facilite l'organisation des itinéraires et améliore la prise de décision en fonction des contraintes géographiques spécifiques.

Le processus débute par la collecte et la préparation des données. Les informations essentielles incluent le réseau routier (e.g., classification des routes, longueur, nature du revêtement) ainsi que les données de nature administratives (administration routière gestionnaire) et géographiques (périmètre du territoire couvert par l'unité spatiale). Ces données sont ensuite traitées, nettoyées, standardisées et consolidées dans un format homogène avant d'être projetées dans un système de coordonnées approprié pour garantir une précision géographique et une compatibilité avec les outils d'analyse spatiale utilisés, tel qu'ArcGIS

Afin de surmonter les limites des approches traditionnelles basées sur des unités administratives, une segmentation spatiale homogène est réalisée à travers une pixellisation. À l'aide de l'outil Fishnet d'ArcGIS, le territoire est subdivisé en grilles régulières, chaque pixel représentant une unité homogène permettant ainsi une granularité fine pour les analyses spatiales. Les routes sont ensuite associées à chaque pixel par des jointures spatiales et le centroïdes de chaque pixels (représenté par un triangle sur la figure 3) sont calculés pour faciliter la conception ultérieure du réseau logistique circulaire.

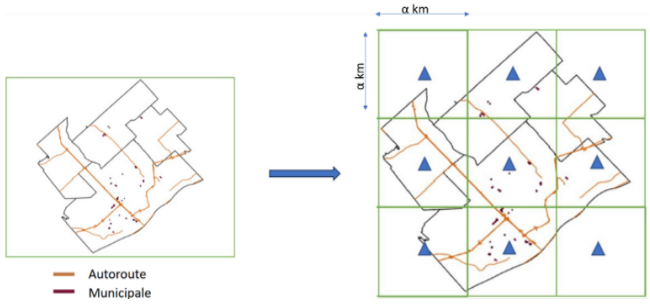


Figure 3.Transformation d'une unité spatiale de municipalité à une unité spatiale en pixels de dimension α km par α km

L'approche d'estimation se concentre exclusivement sur les routes revêtues qui sont directement concernées par les opérations de balayage, tandis que les segments non revêtus (et donc non balayés) sont exclus afin d'éviter une surestimation des quantités. Les longueurs des routes retenues sont attribuées à chaque pixel, en tenant compte de leur type (i.e., autoroute ou route locale dans le cas d'étude) et de leur administration routière gestionnaire. Les quantités de balayures sont estimées à l'aide de taux empiriques basés sur les spécificités opérationnelles des infrastructures routières. Ces taux permettent de modéliser les quantités de résidus générés pour chaque type de route et chaque unité spatiale, selon l'équation générique suivante :

$$Q_{p,a} = \sum_{i=1}^{n} L_{i,p,a} \cdot T_{i,a} \cdot R_{i,a}$$

Où :

$Q_{p,a}$: quantité totale de balayures dans l'unité spatiale p et générée par l'administration routière a

$L_{i,p,a}$: longueur des routes de type i sous la gestion de l'administration routière a dans l'unité spatiale p

$T_{i,a}$: taux de collecte en balayure pour le type de route i par l'administration a

$R_{i,a}$: pourcentage de balayage appliqué pour le type de route i par l'administration a

La somme des quantités pour toutes les unités spatiales d'une administration permet de déterminer sa quantité totale de balayures. L'agrégation des quantités pour toutes les administrations et toutes les unités spatiales fournit une estimation globale de la quantité de résidus à partir de laquelle le réseau logistique circulaire peut s'approvisionner :

$$Q_{totale} = \sum_{\{a \in A\}} \sum_{\{p \in P\}} Q_{\{p,a\}}$$

Les estimations sont ensuite visualisées sous forme de cartes de chaleur dans ArcGIS Pro, permettant de mettre en évidence les zones où les quantités de résidus sont les plus élevés. La figure 4 présente une synthèse des étapes de l'approche d'estimation proposée.

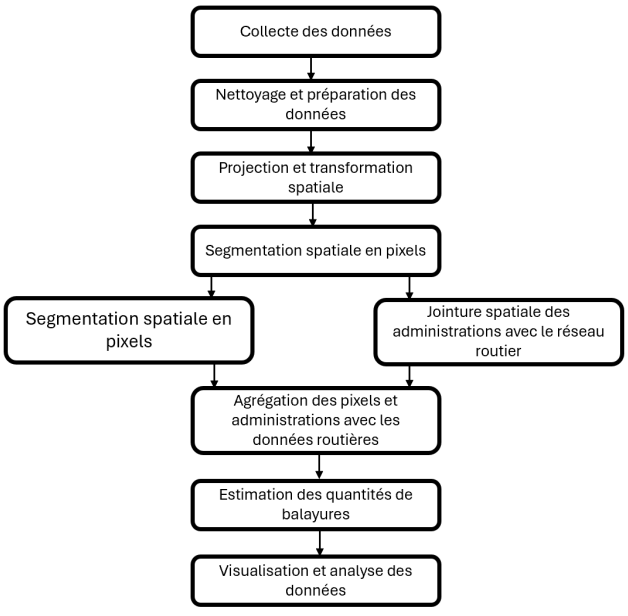


Figure 4.Diagramme du processus de l'approche d'estimation proposée

Cas d'étude

Comprenant 885 municipalités regroupées en 71 Municipalités Régionales de Comté (MRC), le sud du Québec constitue un territoire particulièrement pourvu en matière d'infrastructures routières et d'administrations routières. Cette diversité offre un terrain d'expérimentation pertinent pour l'application de l'approche développée sur deux tailles de pixels comme unité spatiale ainsi qu'une unité spatiale traditionnelle basée sur une division territoriale administrative, soit les municipalités comme illustré sur la figure 5. Notons que la division territoriale des centres de service a été exclue à ce stade pour fin de simplification lors de la présentation des résultats.

Figure 5.Unité spatiale des municipalités dans le sud du Québec

Les données exploitées dans cette étude ont été collectées auprès du ministère des Transports du Québec, principalement à partir des bases AQ Réseau et AQ Réseau Plus, qui fournissent des informations détaillées sur les segments routiers. Comme le montre le tableau 1, chaque segment est identifié en précisant son mode de gestion, sa classification, son propriétaire, la nature de son revêtement et sa distance.

Tableau 1.Exemple de base de données routières

ID Route	Nom de la route	Gestion	Classification	Propriétaire	Nature du revêtement	Distance (km)
1	Chemin de Brill	Municipale	Régionale	MRNF	Revêtue	2.66
2	Chemin Paige	Municipale	Régionale	MTQ	Revêtue	0.17
3	Chemin des Appalaches	Municipale	Régionale	MRC-60	Revêtue	0.18

Après un processus de nettoyage et de standardisation, ces bases ont été consolidées pour garantir la cohérence et la qualité des données spatiales. Une conversion a été effectuée dans un système de coordonnées approprié pour assurer une précision géographique.

Pour garantir la pertinence de l'analyse, seules les routes revêtues ont été retenues conséquemment celles sous la gestion du ministère des Ressources Naturelles et des Forêts (MRNF), de l'Association Québécoise des Forêts et de l'Occupation (AQFO) ainsi que les territoires non organisés ont été exclues tout comme une faible proportion de segments où ce champ était vide. Cette exclusion vise à éviter les biais liés aux zones à faible densité d'infrastructures.

La segmentation spatiale sur la figure 6 repose sur une subdivision du territoire en grilles régulières générées avec l'outil Fishnet d'ArcGIS, permettant ainsi de visualiser une distribution par pixels avec une répartition traditionnelle basée sur les municipalités. Deux tailles alpha de pixels ont été définies : 2 km × 2 km pour une granularité plus fine et 5 km × 5 km pour une vision plus macro.

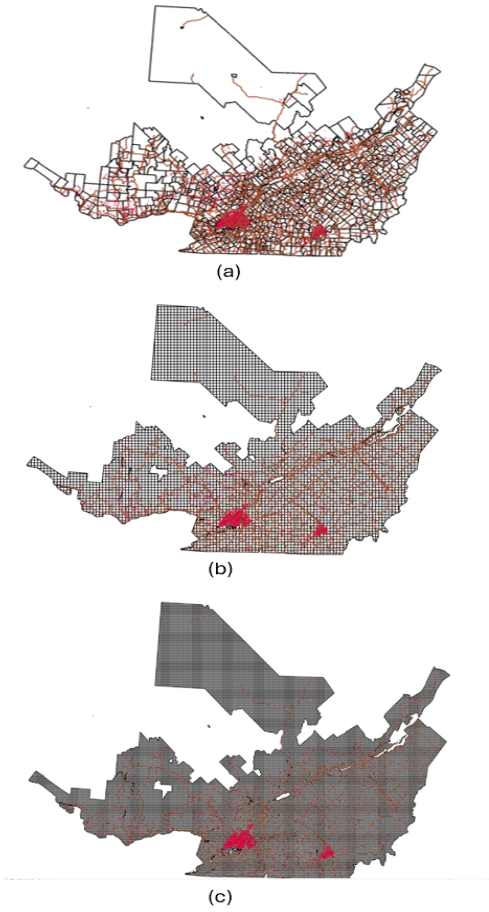


Figure 6. Segmentation spatiale et attribution des routes dans les municipalités (a), un pixel de 5x5 km (b) et un pixel de 2x2 km (c)

Une jointure spatiale a été réalisée entre les routes et chacune des trois unités spatiales étudiée afin d'associer les données de nature administrative et sur les infrastructures du réseau routier. Ceci permet de mesurer avec exactitude les distances attribuées à chaque segment en fonction de leur classification. L'estimation des quantités de balayures collectées repose sur les taux de collecte en balayures établis par Ben Daya et al. (2024), qui indiquent une moyenne de 2,7 tonnes/km pour les autoroutes et 2,3 tonnes/km hors autoroutes.

Les quantités estimées sont calculées en appliquant la formule établie, intégrant les pourcentages de balayage spécifiques à chaque type de route. Ces valeurs, définies à partir des données de diverses municipalités, varient selon la municipalité, comme on peut le remarquer dans le tableau ci-dessous, où les taux de récupération observés fluctuent entre 5 % et 73 %, soulignant les différences dans les pratiques locales et les conditions d'exploitation des routes.

Tableau 2.Taux de collecte des balayures de rues pour différentes municipalités

Taux de récupération (%)	Contexte	Source
70	Edmonton	Donovan, H. (2005). Winter street sand recycling program.
68	Outaouais	Mokhbi, S et al. (2017).
73	Sherbrooke	Ville de Sherbrooke (2011). Récupération et valorisation des abrasifs.
56	Barrie	Reid, J. (2017). Recycled Street Sweepings Pilot Program.
50	Victoriaville	Communication personnelle – Rencontre de projet février 2020.
5 (4,94)	Autoroute (Moyenne des CS du MTQ, n=7)	Blouin, F et al. (2022).

L'application de ces coefficients à l'échelle du réseau routier associé à chaque unité spatiale, permet d'estimer les quantités de résidus qui sont ensuite représentés sous forme de cartographies détaillées et de cartes de chaleur. Dans le cadre de cette étude, un taux de collecte théorique de 100 % a été appliqué afin d'évaluer un scénario maximal. Ces visualisations offrent une lecture fine des zones avec une forte accumulation en résidus.

Résultats

Produites dans ArcGIS Pro, les cartes de chaleur dans la figure 7 illustrent la répartition spatiale des quantités de balayures selon trois unités spatiales (municipalité et deux tailles alpha de pixel, soit 5x5 km et 2x2 km). L'analyse révèle que les pixels de 2x2 km permettent une meilleure capture des détails spatiaux, particulièrement dans les zones densément urbanisées, en mettant en évidence des points chauds de concentration élevée de résidus. En revanche, l'agrégation des données à une échelle plus large, comme les pixels de 5×5 km ou l'échelle municipale, lisse les variations spatiales, rendant plus difficile l'identification des disparités locales et la mise en place d'une gestion optimisée des flux à l'échelle d'un réseau logistique circulaire. Ces cartes permettant d'identifier des zones stratégiques pour l'implantation de centres de conditionnement des résidus.

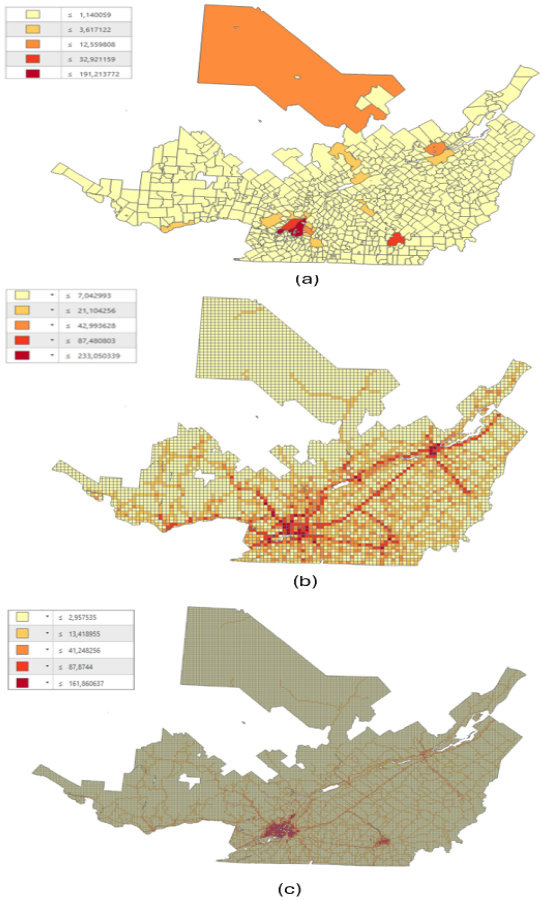


Figure 7.Visualisation des quantités estimées en résidus selon trois unités de granularité spatiale : municipalité (a), pixel 2x2 km (b) et pixel 5x5 km (c)

L'utilisation de grilles régulières (pixels) comme unités spatiales permet de mieux capturer visuellement les variations locales et des concentrations spécifiques qui échappent aux approches traditionnelles basées sur des divisions administratives comme les municipalités. Par exemple, la structuration par pixels met en évidence des disparités locales significatives, offrant ainsi une meilleure base pour la prise de décision ultérieure en matière d'allocation des flux inverses (voir figure 1) de matière et en conception du réseau logistique circulaire. Les statistiques rapportées au tableau 3 soutiennent ces observations. Par exemple, les pixels de 2x2 km a une quantité moyenne de 2,28 tonnes, reflétant une meilleure granularité par rapport aux 94,02 tonnes constatées à l'échelle municipale. De plus, l'écart-type pour les pixels de 2x2 km est de 9,77 tonnes contre 432,82 tonnes pour les municipalités où les disparités sont donc beaucoup plus marquées. Ces résultats soulignent également une densité plus équilibrée pour les pixels de 2x2 km et 5x5 km, confirmant leur pertinence pour des analyses détaillées et fiables.

Tableau 3. Statistiques selon les trois unités de granularité spatiale

Statistique	5x5 km	2x2 km	Municipalité
Moyenne (quantité totale en tonne)	13,56	2,28	94,02
Écart-type (quantité en tonne)	53,63	9,77	432,82
Surface moyenne (en km²)	22,78	3,84	152,54
Densité moyenne (tonne par km²)	0,5954	0,5938	0,6163

La **Figure 8** illustre la répartition des densités moyennes selon les trois unités spatiales. Cette visualisation met en évidence les écarts dans la densité moyenne entre ces niveaux d'agrégation :

- Le pixel **2x2 km** (observations de couleur bleue) offre une répartition plus homogène avec une variabilité mieux maîtrisée, limitant ainsi les valeurs aberrantes (**outliers**).
- Le pixel **5×5 km** (observations de couleur verte) présente une dispersion plus marquée, bien que leur nombre soit inférieur à celui des pixels **2x2 km**.
- La **municipalité** (observations de couleur rouge) révèle des variations plus prononcées, avec des valeurs extrêmes ou des **outliers** plus fréquents, ce qui s'aligne avec les statistiques du **tableau 2**, montrant une quantité moyenne avec un écart-type plus élevé à cette échelle.

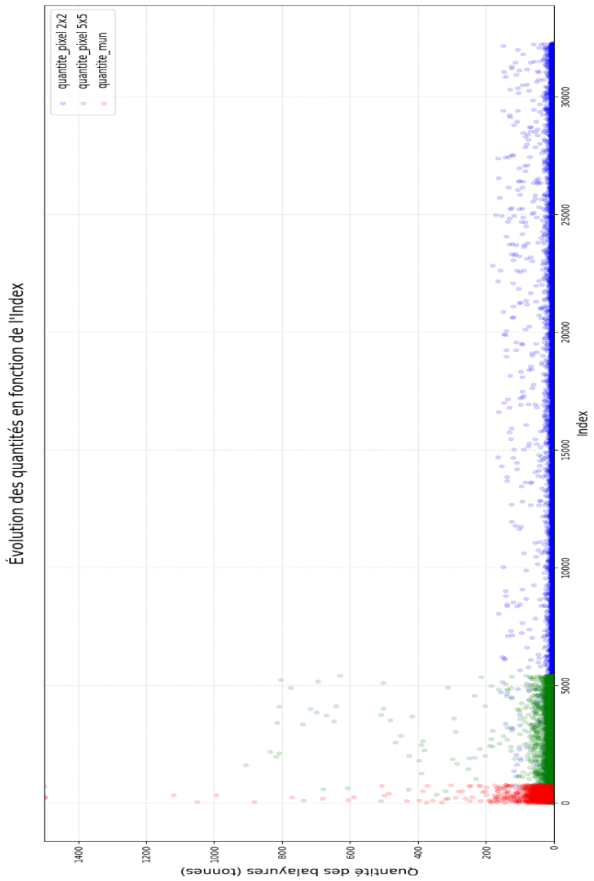


Figure 8. Répartition des densités moyennes en balayures selon les selon les trois unités de granularité spatiale

Ces résultats soulignent l'importance d'adapter la granularité spatiale à l'objectif poursuivi (i.e., conception du réseau logistique circulaire) qui justifie le besoin d'une estimation des quantités en résidus et de leur répartition spatiale. Les pixels de 2×2 km se révèlent particulièrement efficaces pour une analyse locale fine, permettant d'identifier des zones prioritaires. En revanche, les pixels de 5×5 km sont mieux adaptés à une vision régionale et à une planification stratégique plus globale. Cette flexibilité d'échelle spatiale offre aux décideurs une approche personnalisable à cette étape d'inventaire des sources d'approvisionnement dans leur démarche vers la conception d'un réseau logistique circulaire. Par ailleurs, cette précision accrue apportée par une pixellisation fine doit être mise en balance avec les contraintes computationnelles qu'elle engendre, soulignant ainsi la nécessité d'un compromis entre précision spatiale de l'approvisionnement et faisabilité de résolution d'un problème de conception de réseau logistique circulaire en recherche opérationnelle.

Conclusion

Cette publication présente la première approche d'estimation spatiale en résidus de balayures de rues en recourant aux données d'infrastructures du réseau routier sous la responsabilité de chaque administration routière et ceci selon deux avenues d'unité spatiale : par territoire administratif ou par pixélisation. Elle comble une lacune dans la littérature en intégrant une granularité fine et des paramètres géospatiaux spécifiques aux infrastructures routières.

Les résultats confirment que l'approche avec unité spatiale par pixellisation constitue une approche pertinente pour capturer les variations spatiales et soutenir les démarches subséquentes vers la conception d'un réseau logistique circulaire. Elle permet d'adapter le niveau de granularité en fonction des objectifs d'analyse, offrant à la fois un niveau de détail accru pour les zones spécifiques tout en garantissant une vision d'ensemble adaptée à la planification régionale.

Les travaux de Hematian et al. (2024) soulignent l'importance de mutualiser les ressources d'un réseau logistique entre administrations routières afin de notamment réduire les coûts de logistique. En conservant une traçabilité entre la quantité d'approvisionnement en résidus dans une unité spatiale et l'administration routière responsable de cette quantité, l'approche proposée permet de supporter des travaux additionnels en collaboration logistique horizontale entre diverses administrations routières. L'approche proposée étant une première tentative, des travaux futurs pourraient approfondir l'intégration de nouvelles variables afin d'affiner davantage les estimations.

Références:

Barry, C., & Bush, D. (2012). From A to Z: A Potential Role for Grid Cells in Spatial Navigation. *Neural Systems & Circuits, 2*, 6. https://doi.org/10.1186/2042-1001-2-6

Batista e Silva, J., Gallego, J., & Lavalle, C. (2013). A high-resolution population grid map for Europe. *Journal of Maps, 9*(1), 16-28. https://doi.org/10.1080/17445647.2013.764830

Ben Daya, B., Audy, J.-F., & Lamghari, A. (2024). Real-World Data Simulation Comparing GHG Emissions and Operational Performance of Two Sweeping Systems. *Logistics, 8*(4), Article 120.

https://doi.org/10.3390/logistics8040120

Blouin, F., Audy, J.-F., & Lamghari, A. (2022). Circular Economy in Winter Road Maintenance: A Simulation Study. *Sustainability, 14*(23), 15635. https://doi.org/10.3390/su142315635

Blouin, F., & Audy, J.-F. (2023). Circular economy in winter road maintenance: Analysis of contract models for deploying a closed-loop supply chain. *Cleaner Logistics and Supply Chain, 9*, Article 100127. https://doi.org/10.1016/j.clscn.2023.100127

Donovan, H. (2005). *Winter street sand recycling program*. TAC-ATC Conference, 18-21 September, Calgary, Canada. Retrieved from http://atc.ca/english/resourcecentre/readingroom/conference/conf2005/docs/s5/donovan.pdf

Hematian, M., Audy, J.-F., & Lamghari, A. (2024). A closed-loop supply chain network design for sustainable winter road maintenance. *Proceedings of the IISE Annual Conference & Expo 2024*. https://doi.org/10.21872/2024IISE_7045

Kraiem, A., Audy, J.-F., & Lamghari, A. (2024). Adaptive large neighbourhood search for the multi-depot arc routing problem with flexible assignment of end depot and different arc types. *Journal of the Operational Research Society*, 1–19.

Mokhbi, S., Assaf, G. J., & Yacef, N. (2017). Évolution des propriétés physiques des abrasifs routiers exposés à un cycle hivernal et perspectives de leur réutilisation. *Canadian Journal of Civil Engineering, 44*(4), 286-297. https://doi.org/10.1139/cjce-2016-0071

Penížek, V., Zádorová, T., Kodešová, R., & Vaněk, A. (2016). Influence of Elevation Data Resolution on Spatial Prediction of Colluvial Soils in a Luvisol Region. *PLOS ONE*. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0165699

Prieto-Sandoval, V., Jaca, C., & Ormazabal, M. (2018). Towards a consensus on the circular economy. *Journal of Cleaner Production, 179*, 605-615. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.224

Reid, J. (2017). *Recycled Street Sweepings Pilot Program*. Roads, Parks & Department. Retrieved from https://municipalinnovators.ca/wp-content/uploads/2017/05/Recycled-Street-Sweepings-for-Winter-Control_Barrie.pdf

Szczepańska, A., Gościewski, D., & Gerus-Gościewska, M. (2020). A GRID-Based Spatial Interpolation Method as a Tool Supporting Real Estate Market Analyses. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 9*(1), 39. https://doi.org/10.3390/ijgi9010039

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Chantiers Intelligents Résilients : Une Analyse Basée sur la Simulation des Perturbations du Flux de Matériaux

ALI ATTAJER AND BOUBAKEUR MECHERI

[1] INSTITUT DE RECHERCHE DE CONSTRUCTION (IRC), ESTP
28 Avenue du Président Wilson, F-94230 Cachan, France
aattajer@estp.fr, bmecheri@estp.fr

Résumé **– Les chantiers intelligents (Smart Construction Sites, SCS) représentent une avancée révolutionnaire dans le secteur de la construction, intégrant des systèmes automatisés et intelligents pour optimiser l'organisation et le déroulement des activités sur site tout en renforçant leur résilience face aux perturbations. Cette étude présente un modèle de simulation à événements discrets développé sous FlexSim afin d'analyser l'impact des perturbations dans les flux de matériaux sur les principaux indicateurs de performance d'un projet, notamment le temps d'achèvement. Une étude de cas illustre la simulation d'un système SCS où des perturbations sont générées. Ces perturbations se propagent à travers les différentes activités du chantier, retardant les processus de construction et prolongeant les délais du projet. À partir des résultats de la simulation, des stratégies d'adaptation sont proposées pour atténuer les effets négatifs des perturbations. Ces stratégies incluent l'augmentation de la capacité du système, comme le rythme des opérations de construction, afin de garantir un flux de travail plus résilient et efficace dans des conditions variées.**

Mots clés **- Chantiers intelligents (SCS), Perturbations du flux de matériaux, Résilience, Simulation à événements discrets, FlexSim**

Abstract **– Smart Construction Sites (SCS) represent a revolutionary advancement in the construction sector, integrating automated and intelligent systems to optimize the organization and progression of site activities and enhance resilience against disruptions. This study introduces a Discrete Event Simulation (DES) model in FlexSim to analyze the impact of material flow disruptions on key project performance indicators, notably project completion time. A case study demonstrates the simulation of an SCS system in which disruptions are generated. These disruptions propagate through various site activities, delaying construction processes and extending project timelines. Based on the simulation results, adaptive response strategies are proposed to mitigate the adverse effects of disruptions. These strategies include increasing system capacity such as the cadence of construction operations, ensuring a more resilient and efficient workflow under varying conditions.**

Keywords **– Smart Construction Sites (SCS), Material flow disruptions, Resilience, Discrete-Event Simulation, FlexSim**

Rihem BERBERE[1,2], Cyril DESCHAMPS[1],Camelia DADOUCHI[1,2], Robert PELLERIN[1,2,3] , Safa Bhar LAYEB[4,5], Nathalina CRASCI[6]

[1] LABORATORY OF DATA INTELLIGENCE (LID)
DEPARTMENT OF MATHEMATICS AND INDUSTRIAL ENGINEERING, POLYTECHNIQUE MONTREAL
2500 Polytechnique Road, Montreal, H3T 1J4, Quebec, Canada.
rihem-2.berbere@polymtl.ca, cyril.deschamps@polymtl.ca, camelia.dadouchi@polymtl.ca , robert.pellerin@polymtl.ca

[2] INTERUNIVERSITY RESEARCH CENTER ON ENTERPRISE NETWORKS, LOGISTICS AND TRANSPORTATION (CIRRELT)

[3] JARISLOWSKY/ATKINSRÉALIS RESEARCH CHAIR
P.O. Box 6079, Downtown Station, Montreal, Quebec, Canada H3C 3A7.

[4] NATIONAL ENGINEERING SCHOOL OF TUNIS, UNIVERSITY OF TUNIS EL MANAR
Béchir Salem Belkhiria Street, University Campus, BP 37, 1002 Le Bélvédère, Tunis, Tunisia.
safa.layeb@enit.utm.tn

[5] INDUSTRIAL ENGINEERING CENTER, TOULOUSE UNIVERSITY, IMT MINES ALBI,
Albi, France

[6] SOCIÉTÉ DE TRANSPORT DE MONTRÉAL (STM), DIRECTORATE OF INTEGRATION, ELECTRIFICATION, PLANNING, AND LOGISTICS, SECTION
Montreal, Canada
Nathalina.Crasci@stm.info

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Optimizing Spare Parts Management: A Segmentation Approach for Intermittent Demand in Public Transportation Systems

***Abstract* – Effective spare parts management is essential for public transportation systems to maintain high service levels while minimizing operational costs. This study develops a methodology for optimizing storage strategies by segmenting spare parts based on their consumption patterns. Covering the best practices from the literature and insights from a practical case study, the approach involves redefining the consumption identification process to create a comprehensive consumption history using real ERP data. A segmentation method tailored for time-series analysis, defined by demand profiles, was applied to classify spare parts. The analysis identified nine distinct groups among thousands of active items and a group of inactive items still in stock. This group was found to be 60% larger than previously estimated, leading to high annual storage costs—double the earlier projection. The findings underscore the critical role of accurate segmentation in inventory cost optimization, while also addressing implementation challenges such as group determination, subjectivity, and the necessity for dynamic updates.**

***Résumé*–La gestion efficace des pièces de rechange est essentielle pour les systèmes de transport public afin de maintenir un haut niveau de service tout en minimisant les coûts opérationnels. Cette étude propose ainsi une méthodologie visant à optimiser les stratégies de stockage en segmentant les pièces de rechange en fonction de leurs profils de consommation. S'appuyant sur les meilleures pratiques issues de la littérature et les enseignements d'une étude de cas pratique, l'approche redéfinit le processus d'identification des consommations pour créer un historique complet à partir de données réelles issues d'un ERP. Une méthode de segmentation adaptée à l'analyse des séries temporelles, basée sur les profils de demande, a été appliquée pour classer les pièces de rechange. L'analyse a permis d'identifier neuf groupes distincts parmi des milliers d'articles actifs, ainsi qu'un groupe d'articles inactifs encore en stock. Ce dernier s'est révélé 60 % plus important que les estimations précédentes, entraînant des coûts de stockage élevés , soit le double de la projection initiale. Les résultats montrent l'importance cruciale d'une segmentation précise pour l'optimisation des coûts d'inventaire tout en soulignant les défis d'implémentation liés à la détermination des groupes, à la subjectivité et à la nécessité d'une mise à jour dynamique.**

***Mots-clés* – Gestion des pièces de rechange, Demande intermittente, Segmentation, Transport public, Optimisation d'inventaire.**
***Keywords* – Spare Parts Management, Intermittent Demand, Segmentation, Public Transportation, Inventory Optimization**

1 Introduction

The reliability of a public transportation network is highly dependent on the availability of spare parts, which are critical in ensuring uninterrupted service and minimizing operational disruptions. Good spare parts management is important for maintaining service levels and improving inventory cost efficiency. Spare components, often characterized by dynamic demand patterns, play a critical role in maintaining operational continuity. In public transportation, the absence of a critical part may lead to delays in service, reduced customer satisfaction, and significant financial losses. Thus, the need for strong strategies in inventory optimization that balance service reliability and cost efficiency is felt. The spare parts inventory management is even more challenging because of the intermittent and sporadic nature of the demand. Products characterized by low or erratic consumption patterns may well result in incorrect demand forecasts, excessive inventory levels, or even the accumulation of dead stock, needlessly raising the costs of storage. Traditional methods of segmentation, such as ABC classification, are usually incapable of handling this kind of complexity surrounding sporadic demand patterns. The problems of identifying poorly performing inventory classes and tailoring management strategies are further compounded by a lack of reliable consumption records and standardized classification schemes. Addressing these challenges requires a systematic approach that integrates advanced segmentation techniques and data-driven insights.

The present study will design and apply a segmentation approach aiming at improving the spare parts inventory management by using consumption data. The major goals are twofold: (1) to recast the method to construct a general and accurate consumption history, and (2) to classify spare parts based on their demand patterns by using advanced clustering methods. The scope of this research encompasses the identification of certain categories of spare parts, the evaluation of inactive inventory, and the creation of inventory management policies tailored to each category. This approach facilitates the optimization of inventory costs and enhances the decision-making processes related to public transportation systems.

The rest of this paper is organized as follows: Section 2 presents a literature review of segmentation methodologies and the challenges involved in dealing with intermittent demand for spare parts. Section 3 outlines the proposed methodology, including data collection, preprocessing, segmentation, and validation techniques. Section 4 presents the results obtained from the segmentation framework and analyzes its relevance for inventory optimization. Section 5 discusses both the practical and theoretical implications of the findings besides delineating the limitations of the proposed methodology. Finally, Section 6 concludes the paper by offering critical observations and recommendations for future research studies.

2 Literature Review

Intermittent demand, characterized by sporadic and irregular consumption, poses significant challenges for inventory management, particularly in forecasting and classification. The literature defines intermittent demand as demand patterns with a high proportion of zero values interspersed with sporadic consumption peaks, making traditional forecasting methods insufficient [Teunter et al., 2011; Syntetos et al., 2015]. Deadstock refers to inventory that has remained unused over a specific period, often due to low or no demand, leading to unnecessary storage costs and wasted resources [SAP, 2018; Nyemba & Mbohwa, 2016]. In practice, organizations often set arbitrary thresholds to define dead stock, which varies widely and fail to reflect the actual consumption characteristics of the items [Sungiono & Alimbudiono, 2020]. Properly distinguishing between slow-moving and dead stock is essential, as misclassification can result in either excess inventory or inadequate availability of critical parts [Huiskonen, 2001]. Traditional segmentation methods, such as ABC classification, rely on unidimensional factors like annual usage or monetary value [Dickie, 1951]. While simple to implement, these approaches often fail to account for the multidimensional nature of spare parts demand, particularly for items with intermittent or sporadic demand profiles [Hu et al., 2017]. Modern segmentation techniques incorporate metrics such as the Average Demand Interval (ADI) and Coefficient of Variation squared (CV^2) to address these complexities [Syntetos et al., 2015]. These metrics enable categorization based on both frequency and variability of demand, offering more nuanced insights than traditional methods. Advanced clustering algorithms, such as K-Shape for time-series data and K-Means for multidimensional analysis, have also been employed to group items with similar demand characteristics [Liu et al., 2015]. Such methods allow for the identification of distinct consumption profiles, facilitating the application of tailored inventory management strategies [Lolli et al., 2014]. Furthermore, hybrid approaches combining Analytic Hierarchy Process (AHP) with clustering algorithms enhance objectivity by reducing the subjectivity inherent in traditional classification systems [Lolli et al., 2014]. Critically, the literature emphasizes the importance of integrating segmentation with lifecycle stages and criticality factors. For instance, [Persson & Saccani, 2009] proposed a lifecycle-based segmentation framework, while [Bosnjakovic, 2010] focused on critical dimensions to address the specific needs of critical spare parts.

Despite advancements in segmentation techniques, significant gaps remain. Many existing methods assume the availability of consistent and well-defined demand data, which is rarely the case in real-world scenarios [Syntetos et al., 2015]. Additionally, most contributions overlook the dynamic nature of demand, relying on static segmentation models that fail to accommodate shifts in consumption patterns over time [Teunter et al., 2011]. Another limitation lies in the subjectivity of classification thresholds and grouping criteria. While multidimensional approaches address some of these issues, the selection of dimensions and weights often lacks standardization, making it difficult to replicate or scale these methods across different contexts [Hu et al., 2017]. Furthermore, few studies have explored the integration of segmentation with predictive modeling to proactively manage inventory levels [Sareminia & Amini, 2022].

This study aims to address these gaps by developing a segmentation methodology tailored for intermittent demand in public transportation systems. The proposed approach seeks to create actionable insights for inventory optimization while ensuring scalability and adaptability to dynamic demand environments by relying on advanced clustering techniques and redefining data preprocessing practices.

3 METHODOLOGY

This study employs a structured methodology to develop a segmentation framework for spare parts inventory with intermittent demand. The approach is organized into three key phases: data collection and preprocessing, segmentation framework development, and validation phase..

3.1 Data Collection and Preprocessing

Efficient segmentation of spare parts begins with a robust data foundation. This research uses historical transactional data extracted from an Enterprise Resource Planning (ERP) system, focusing on consumption-related activities. The preprocessing pipeline ensures the construction of an accurate and comprehensive consumption matrix, which

serves as the input for subsequent analyses. The key steps in this process are as follows:

3.1.1 Data Cleaning

The raw transaction data is often affected by anomalies such as incomplete entries, invalid article references, or incorrect data types. A systematic cleaning process is applied to:

A. Identify and remove outliers, such as transactions with missing article identifiers or non-existent item references.
B. Standardize column types to ensure compatibility with computational tools (e.g., converting text fields to numeric formats where applicable).

3.1.2 Construction of the Consumption Matrix

The construction of the consumption matrix involves transforming raw transactional data into a structured representation of daily demand profiles for each item. To achieve this, transactions are processed through a series of filtering steps to retain only those that reflect actual consumption while removing irrelevant entries. This process is illustrated in Figure 1.

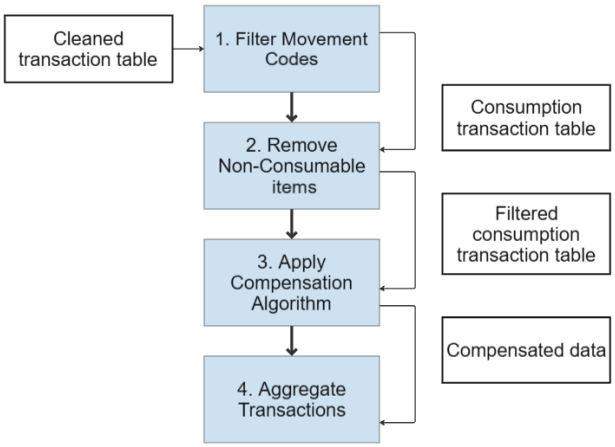


Figure 1. Process for Creating the Consumption Matrix

In Step 1, Filter Movement Codes, transactions related to stock adjustments, returns, or internal transfers—entries that do not correspond to real consumption—are removed to guarantee that only genuine demand records are retained.
In Step 2, Remove Non-Consumable Items, articles not intended for direct consumption, such as those categorized as "to be repaired," are excluded to make sure that the dataset focuses just on consumable inventory in order to refine the accuracy of demand analysis.
In Step 3: Apply Compensation Algorithm, we address fragmented transactions, which often occurs due to partial consumption events caused by stockouts, where demand is recorded in multiple entries rather than a single transaction. To correct this, a compensation algorithm is applied.
This compensation algorithm handles two main cases:

1. Transactions with a reservation or order number where we match the consumed and returned quantities to make sure the recorded demand is accurate;

2. Transactions without a reference number illustrated in Figure 2. In this case, the system checks the total consumed and returned items at the cost center level. If more items are returned than initially consumed, the system adjusts the records and flags any inconsistencies for correction. The algorithm works iteratively by balancing return transactions (Tr) against corresponding consumption transactions (Tc). When $Tc + Tr > 0$, it adjusts Tr to reflect the remaining value and sets $Tc = 0$. If $Tc + Tr \leq 0$, Tr is fully compensated, and any remaining Tc is updated accordingly. This ensures that the final consumption values accurately reflect the true demand history, correcting for fragmented or partial transactions.

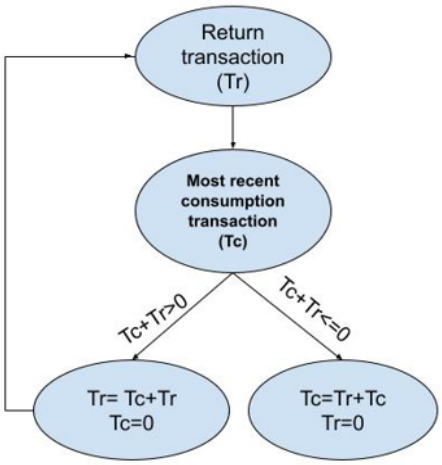


Figure 2. Compensation Algorithm Based on Cost Centers

Once the compensation process is complete, we apply Step 4, Aggregate Transactions, in Figure 1 where daily consumption values are consolidated for each item, ensuring that the final consumption matrix accurately reflects actual demand patterns

3.2 Segmentation Framework

The segmentation technique follows a two-step approach to classify spare parts based on demand patterns. First, we use ADI/CV² statistical metrics for an initial categorization.

Then, we refine the segmentation by applying time-series clustering (K-Shape) to identify patterns in consumption over time. This combination guarantees both quantitative precision and trend-based grouping to reduce misclassification and capture hidden demand behaviors.

3.2.1 Demand Profiling Using ADI/CV² Metrics

To initiate the segmentation process, spare parts are categorized using two critical metrics: the Average Demand Interval (ADI) and Coefficient of Variation squared (CV²). These metrics provide a quantitative basis for understanding the intermittent and variability of demand.

The ADI is calculated as:

$$ADI = \frac{Total\ number\ of\ period}{Number\ of\ non\ zero\ demands} \quad (1)$$

The Coefficient of Variation squared (CV²) is defined as:

$$CV^2 = \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^2 \quad (2)$$

Items are plotted on the ADI-CV² plane, where the boundaries for categorization are established based on the literature:

- Smooth Demand: Low ADI and low CV²;
- Intermittent Demand: High ADI and moderate CV²; and
- Lumpy Demand: High ADI and high CV².

This profiling stage provides an initial segmentation, enabling a structured approach to classify items with varying demand characteristics.

3.2.2 Time-Series Clustering with K-Shape

The K-Shape clustering algorithm is employed to refine the segmentation. This method groups items with similar temporal demand patterns based on their consumption history. Unlike traditional clustering algorithms, K-Shape uses a normalized cross-correlation metric, emphasizing the shape similarity of time-series data rather than their absolute values. The time-series data (consumption matrix) is first standardized to ensure consistency in clustering. This transformation ensures that all-time series have a mean of 0 and a standard deviation of 1. The optimal number of clusters is determined using the elbow method. This involves plotting intra-cluster variance (inertia) as a function of the number of clusters and identifying the "elbow point," where the rate of decrease in variance slows down. Once the number of clusters is determined, the K-Shape algorithm assigns items to clusters based on their demand profiles. The clustering results in group items with similar demand patterns. Domain experts review the clusters for practical applicability, and if necessary, further refinements are made by adjusting clustering parameters or conducting additional segmentation iterations.

3.3 Validation Techniques

The validation process ensures that the segmentation framework produces meaningful and actionable groupings by evaluating both intra-group similarity and inter-group dissimilarity. The Dynamic Time Warping (DTW) metric measures the alignment of time-series demand profiles, allowing for a precise comparison of consumption patterns. For each group, a representative profile is selected based on its proximity to other profiles in the group. Inter-group dissimilarity is assessed by applying DTW between these representative profiles, with higher distances indicating better separation between groups.

Intra-group validation focuses on evaluating the homogeneity of demand profiles. Low average DTW distances within a group suggest strong similarity, while key metrics such as Average Demand Interval (ADI), Coefficient of Variation squared (CV²), and average consumption levels are analyzed to confirm consistency. These metrics help define representative characteristics for each group, supporting the application of tailored inventory strategies.

4 Results and Analysis

This section presents the results of applying the proposed segmentation and classification methodology to the dataset.

4.1 Data Cleaning and Consumption Matrix Creation

The initial dataset comprised 2,775,565 transaction records from January 1, 2019, to July 31, 2023. The previously detailed data-cleaning process removed invalid entries, such as transactions lacking associated item identifiers or containing invalid item references. This step improved data quality by eliminating 386,605 anomalous entries, representing 14% of the dataset. Additionally, fragmented transactions were reconciled using the compensation algorithm, which addressed inconsistencies between initial consumption and returned items.

Ultimately, the cleaned dataset was used to create a structured consumption matrix encompassing 39,211 items, or 45% of the catalog, effectively mapping daily demand patterns across the inventory. Table 1 summarizes these preprocessing results:

Table 1. Summary of Data Preprocessing Results.

Metric	Value
Initial Transactions	2,775,565
Removed (Anomalous) Entries	386,605
Compensated Transactions	408,793
Items in Consumption Matrix	39,211

4.2 Segmentation Results

The segmentation framework was applied using ADI/CV² metrics and K-Shape clustering. The process initially resulted in eight distinct groups, further refined into nine final groups after re-evaluating specific clusters. 33,231 active items were segmented based on their demand profiles. 54,131 inactive items were identified (62% of the catalog). 15,494 items were identified as dead stock, constituting 18% of all catalog items. Figure 3 represents the Proportion of Active, Inactive, and Dead Stock Items.

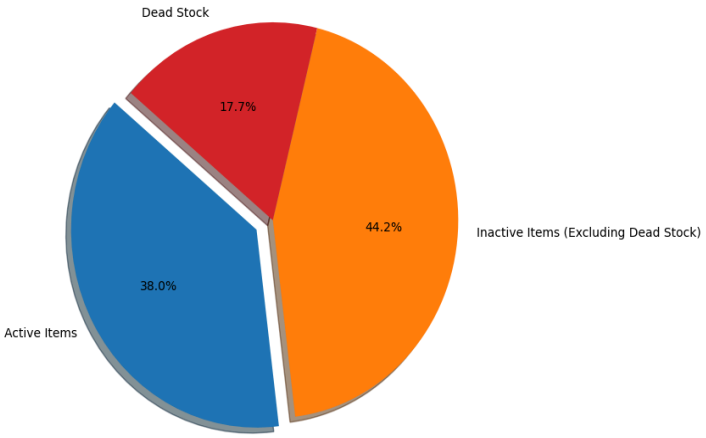


Figure 3. Proportion of Active, Inactive, and Dead Stock Items

Additional metrics, such as average monthly consumption, frequency of usage, and inactivity periods, were calculated to define the key characteristics of each group. We combined these insights with expert validation to interpret meaningful group-level summaries that align with operational realities summarized in Table 2.

Table 2. Segmentation Results.

Group ID	Number of Items	Key characteristics
1	7,200	High and regular demand
2	5,400	Regular demand with consistent consumption
3	4,100	Moderate regularity, higher ADI compared to Group2
4	12,000	Sporadic demand, varying patterns
5	3,900	Intermittent demand with low regularity
6	3,100	Similar to Group 5 but with lower average consumption
7	3,300	Items near inactivity
8	2,000	Recently added items with regular consumption
9	1,800	Recently inactive items
Dead Stock	15,494	No consumption in the last 36 months, associated with high storage costs

The classification was validated using intra-group and inter-group similarity metrics, primarily employing Dynamic Time Warping (DTW) in Figure 4. The similarity matrix showed distinct separation, with most groups achieving low similarity scores (<30%). However, Group 2 shared 80% similarity with Group 4 due to overlapping patterns. This overlap was explained by the presence of periods with consistent consumption in all three groups, complicating differentiation by the K-Shape clustering algorithm. Within groups, average DTW distances demonstrated high internal consistency, with >75% of items in each group sharing similar demand patterns.

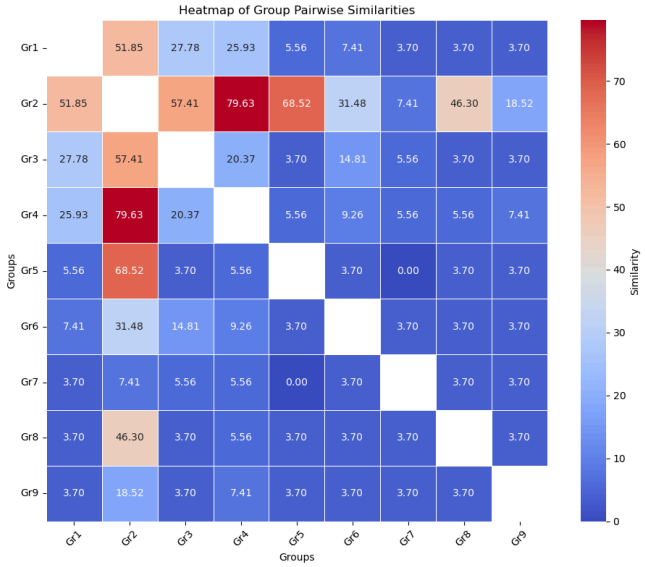


Figure 4: Heatmap of Group Pairwise Similarities.

Intra-group validation focused on verifying the similarity of demand profiles within each group. Low average distances indicated strong similarity within the groups. Key findings showed that for group 2, 93% of items had an average time interval between two consumptions of fewer than 5 months, confirming their classification as regularly consumed items. Figure 5 represents the Distribution of items in Group 2 by Average Delay.

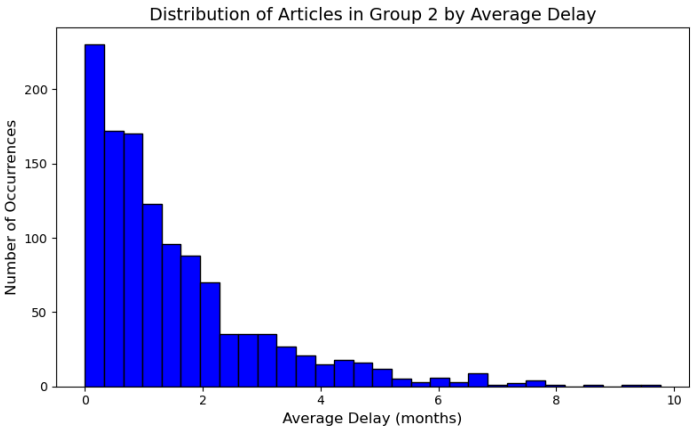


Figure 5: Distribution of Items in Group 2 by Average Delay.

Group 3 highlighted in Figure 6 that 71% of items had intervals below 5 months, but 29% displayed longer delays, introducing some heterogeneity.

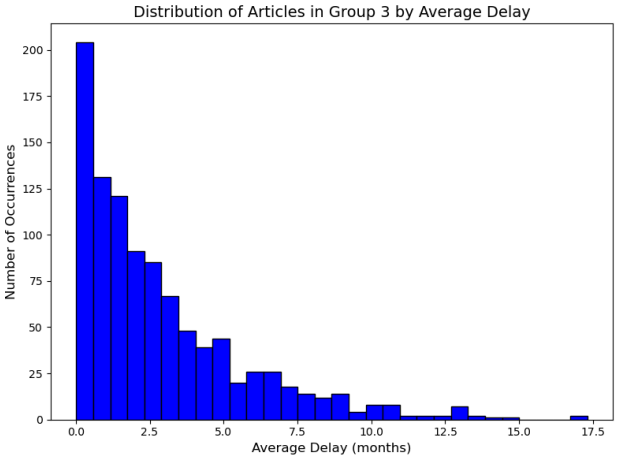


Figure 6: Distribution of Items in Group 3 by Average Delay.

Pairing this with the ADI/CV² in Figure 7, distribution showed that 71% of items had a low CV² (<10), indicative of consistent quantities consumed. However, almost a third of the items exhibited irregular demand patterns, suggesting partial misclassification.

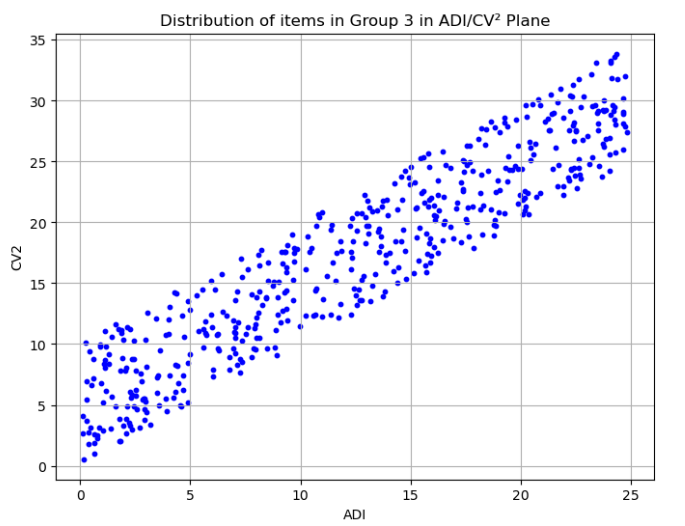


Figure 7: Distribution of items in Group 3 in ADI/CV² Plane.

For group 4, 80% of items exhibited average delays between consumptions below 8 months, with 54% recording consumptions in fewer than 10 months across the studied period. This reflects intermittent but consistent demand, though outliers with irregular patterns highlighted room for refinement.

Finally, the revised framework identified 15,494 dead stock items, which is 13% more than the 9,707 items previously estimated by the organization and revealed that the actual storage cost is twice as high as previously estimated.

5 Discussion

This study aims to optimize spare parts management in public transportation systems by employing a data-driven segmentation framework. We matched inventory management practices with operational goals—such as cost efficiency, service reliability, and stock optimization—the segmentation of spare parts into distinct demand profiles enables the adoption of tailored inventory strategies, ultimately enhancing decision-making processes. Integrating the proposed methodology with existing Enterprise Resource Planning (ERP) systems ensures seamless implementation. The preprocessing pipeline, which incorporates data cleaning, consumption matrix construction, and advanced clustering algorithms, demonstrates adaptability to real-world ERP datasets. This integration improves data accuracy and facilitates dynamic updates to inventory classifications, enabling organizations to address evolving demand patterns proactively. Key insights include identifying inactive items representing 36% of total stock. These results highlight the cost-saving potential of systematic segmentation and the importance of refining existing classification frameworks. The methodology's ability to pinpoint inefficiencies in current practices makes it highly relevant for public transportation operators striving for resource optimization.

Despite its practical benefits, the study faced challenges, particularly in the subjective determination of the optimal number of groups during segmentation. While the elbow method and expert validation provided valuable guidance, the inherent subjectivity of these processes can limit replicability across different contexts. This challenge underscores the need for hybrid approaches that integrate domain-specific knowledge with automated optimization techniques to enhance the robustness of group definitions.

Additionally, the dynamic nature of demand profiles necessitates continuous updates to the segmentation framework. Static classifications risk becoming obsolete as demand patterns evolve due to seasonal variations, shifts in maintenance schedules, or operational changes. Implementing a dynamic system capable of periodically reassessing and reclassifying items remains an essential next step for organizations adopting this methodology. The segmentation framework also encountered limitations in handling items with overlapping demand characteristics. For example, certain groups exhibited high internal variability, complicating the application of uniform inventory strategies. Addressing this issue requires incorporating additional demand predictors or refining clustering algorithms to achieve more precise classifications.

6 Conclusion

This research applies a data-based segmentation model in practice for optimizing spare part management in public transport networks. Through the use of sophisticated clustering algorithms and a thorough data preprocessing pipeline, the approach enhances inventory classification performance while revealing inefficiencies in present processes. Substantial findings include the identification of dead items amounting to 62% of the catalog, as well as the accurate classification of dead stock, which was 13% higher than the previous estimate, translating into annual storage costs twice as high as previously estimated. These findings demonstrate the framework's ability that results in significant cost savings and flexibility in being able to accommodate real ERP datasets.

The validation process, as per metrics such as Dynamic Time Warping, was highly consistent between groups (over 75%) and strongly differing between groups (less than 30%

similarity), verifying the success of segmentation processing. While partial misclassification did exist among some of the groups, areas for improvement were noted, particularly in terms of variability in demand as well as overlapping profiles. The results show that dynamic adjustment of the framework is required to adapt to changing operational demands. In conclusion, the suggested methodology provides useful insight for inventory policies, bringing them into line with key objectives such as cost-effectiveness and service reliability. In the future, predictive models would be integrated to further improve the framework's capacity to predict volatility in demand, enabling proactive inventory control. In addition, the inclusion of data from outside sources, i.e., maintenance schedules, failure rates, and operating conditions, would make it a more context-dependent inventory management strategy.

Références

Bosnjakovic, B. (2010). Multicriteria inventory model for spare parts. Technical Gazette.

Dickie, J. (1951). ABC classification: A basis for inventory control. Journal of Operational Research.

Hu, X., Zhou, Y., & Shen, Y. (2017). Spare parts classification in industrial manufacturing using the dominance-based rough set approach. European Journal of Operational Research.

Huiskonen, J. (2001). Maintenance spare parts logistics:International Journal of Production Economics.

Special characteristics and strategic choices.

Liu, X., Zhang, Y., & Wang, J. (2015). A classification approach based on the outranking model for multiple criteria ABC analysis. Omega.

Lolli, F., Ishizaka, A., & Gamberini, R. (2014). New AHP-based approaches for multi-criteria inventory classification. International Journal of Production Economics.

Nyemba, W., & Mbohwa, C. (2016). Design of a 10-digit inventory codification system for a tube and pipe manufacturing company. Global Conference on Sustainable Manufacturing.

Persson, G., & Saccani, N. (2009). Managing the after-sales logistic network – a simulation study. Production Planning and Control.

Syntetos, A., Babai, M. Z., & Boylan, J. E. (2015). Forecasting intermittent inventory demands: Simple parametric methods vs. bootstrapping. Journal of Business Research.

Teunter, R. H., Babai, M. Z., & Syntetos, A. A. (2011). Intermittent demand: Linking forecasting to inventory obsolescence. European Journal of Operational Research.

Sareminia, M., & Amini, M. (2022). A reliable and ensemble forecasting model for slow-moving and repairable spare parts: Data mining approach. Computers in Industry.

Sungiono, M., & Alimbudiono, R. (2020). Slow moving and dead stock: Some alternative solutions. International Symposium on Management.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Gestion d'outillage améliorée par l'utilisation du jumeau numérique : évaluation par simulation de deux niveaux de maturité

CHLOE SAMUEL[1], PASCAL FORGET[1], JEAN-FRANÇOIS AUDY[1], MARC-ANDRE GAUDREAU[1]

[1] UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES
3351 boul. des Forges, Trois-Rivières, Canada, G9A 5H7
chloe.samuel@uqtr.ca; pascal.forget@uqtr.ca; jean-francois.audy@uqtr.ca; marc-andre.gaudreau@uqtr.ca

Résumé – L'augmentation de la diversité et la personnalisation des produits complexifient les processus de fabrication. Une gestion de l'outillage devient nécessaire. L'Industrie 4.0, plus précisément le jumeau numérique, offre certains avantages permettant d'améliorer la gestion de l'outillage. L'objectif de cet article est de comparer les performances de deux niveaux de maturité (X_0 et X_1) du jumeau numérique dans un contexte de gestion d'outillage. Une revue de littérature sur la gestion d'outillage, le jumeau numérique et l'utilisation du jumeau numérique pour la gestion d'outillage est présentée. Ensuite, un modèle de simulation est proposé, qui présente deux niveaux de maturité de jumeau numérique appliqué dans un contexte de gestion d'outillage d'une usine-laboratoire. Les taux d'utilisation des outils, les temps d'attente des employés et les temps de déplacement de ces derniers sont les indicateurs de performances évalués. Les résultats indiquent une diminution de 18,9% du temps d'attente et de 50% du temps de déplacement entre le niveau de maturité sans technologie de traçabilité (X_0) et avec un niveau de traçabilité par zone (X_1). En ajoutant une technologie de traçabilité des outils dans le jumeau numérique simulé, une meilleure productivité et une meilleure utilisation des outils sont observées. De futures recherches pour valider l'approche à plus grande échelle et pour explorer des niveaux de maturité plus avancés sont suggérées.

Abstract – The increasing diversity and customization of products make manufacturing processes more complex. Effective tooling management becomes necessary. Industry 4.0, and more specifically the digital twin, offers certain advantages for improving tooling management. This article aims to compare the performance of two maturity levels (X0 and X1) of the digital twin in the context of tooling management. A literature review on tooling management, the digital twin, and its application in tooling management is presented. Then, a simulation model is proposed, showcasing two maturity levels of the digital twin, applied to tooling management in a teaching factory setting. The tool utilization rates, employee waiting times, and employee movement times are the evaluated performance indicators. The results show an 18.9% reduction in waiting time and a 50% reduction in movement time between the maturity level without traceability technology (X0) and the zone-based traceability level (X1). By integrating tool traceability technology into the simulated digital twin, higher productivity and improved tool utilization are observed. Future research is suggested to validate this approach on a larger scale and to explore more advanced maturity levels.

***Mots clés* – Jumeau numérique, gestion d'outillage, simulation, niveaux de maturité**
***Keywords* – Digital twin, tool management system, simulation, maturity levels**

1 INTRODUCTION

Le cycle de vie d'un produit est accéléré par le profil de la demande client qui change (Shimada & Suwa, 2021). Les clients s'attendent à avoir un produit personnalisé rapidement (Stoldt et al., 2018). L'augmentation de la personnalisation vient augmenter la diversité des produits et la complexité des processus (Schaupp et al., 2017). Pour répondre à ces exigences, les entreprises doivent revoir leurs processus de fabrication de produit (Stoldt et al., 2018). Cette diversité de produit engendre une augmentation du nombre d'échanges d'outils entre les employés (Schaupp et al., 2017; Schreiber et al., 2023) . Un système de gestion d'outillage devient pertinent afin d'optimiser ce partage grandissant et diminuer la recherche d'outils. La mise en place d'un système de gestion d'outillage exige plusieurs données relatives aux outils (Darányi et al., 2022). L'absence de ces données dans les entreprises entrainent une gestion d'outillage inadéquate (Darányi et al., 2022).

L'Industrie 4.0 intègre de nouvelles technologies qui permettent l'acquisition et le traitement de données. L'internet des objets (Lee et al., 2018; Shicong et al., 2022) et l'intelligence artificielle sont des technologies pouvant être utilisées dans un contexte de gestion d'outillage (Denkena et al., 2014). D'autres technologies permettent d'intégrer les avantages des technologies précédentes, tout en ajoutant de nouvelles fonctionnalités. Le jumeau numérique est l'une de ces technologies, mais elle n'a pas ou peu été explorée dans un contexte de gestion d'outillage (Samuel et al., 2023). L'intérêt accru en recherche pour cette technologie a fait ressortir plusieurs nouvelles applications possibles (Samuel et al., 2024). Le concept du jumeau numérique peut être divisé en plusieurs niveau d'implantation (Metcalfe et al., 2023). Samuel et al. (2024) présentent un cas d'application théorique potentiel pour

l'application de ces niveaux. Cependant, les niveaux de maturité n'ont pas été testés pour des cas réels, que ce soit par simulation ou sur le plancher de production (Samuel et al., 2024).
L'objectif de cet article est de comparer, par le recours à la simulation, les performances en gestion d'outillage pour deux niveaux de maturité, soit un niveau X_0, où aucune technologie de traçabilité n'est utilisée, et un niveau X_1, où on déploie une technologie de suivi par zone des outils en temps réel, permettant une traçabilité à l'échelle de compartiments dans une usine. Cette comparaison, basée sur une simulation du comportement des deux scénarios, permet de montrer les avantages du niveau X_1 par rapport au niveau X_0 afin d'alimenter une analyse technico-économique complète sur la mise en œuvre de la technologie de traçabilité par zone simulé et/ou d'explorer des prochains niveaux de maturité. La suite de cet article propose à la section 2 une revue de littérature, puis à la section 3 la méthodologie employée. Ensuite, les résultats sont présentés à la section 4, suivi d'une discussion à la section 5, ainsi qu'une conclusion à la section 6.

2 REVUE DE LITTERATURE

2.1 Gestion d'outillage

Selon Denkena et al. (2014), la gestion d'outillage est un système qui maximise la performance des outils, qui optimise la sélection des outils et qui réduit le temps d'inactivité causés par l'absence d'un outil. Schaupp et al. (2017) identifie que l'un des principaux défis de la gestion d'outillage est d'identifier la quantité optimale de chaque outil à posséder.
Les outils représentent une partie des coûts de production. Darányi et al. (2022) indiquent que les coûts liés aux outils peuvent être réduits par l'intégration d'une gestion d'outillage, par un choix optimal du nombre d'outils et par l'optimisation du processus de fabrication. Svinjarević et al. (2007) concluent que la gestion d'outillage permet de réduire les coûts liés aux outils. Selon Svinjarević et al. (2007) la première étape pour implanter la gestion d'outillage est d'établir une base de données et une communication entre celle-ci et les utilisateurs. L'acquisition de données et le suivi sont des facteurs essentiels pour la gestion d'outillage (Schreiber et al., 2023). L'utilisation de données en temps réel permet d'observer une meilleure régulation et un meilleur contrôle sur la gestion des outils (Xie et al., 2021). Les technologies de traçabilité peuvent influencer considérablement l'optimisation de la gestion d'outillage (Schaupp et al., 2017). Plusieurs auteurs précisent que d'intégrer l'Industrie 4.0 à la gestion d'outillage permettrait une meilleure performance de cette dernière (Darányi et al., 2022; Schaupp et al., 2017; Schreiber et al., 2023).

2.1.1 Indicateur de performance en gestion d'outillage

L'utilisation d'indicateurs de performance est nécessaire afin de mesurer la performance en gestion d'outillage. Selon Schaupp et al. (2017), deux indicateurs possibles de la gestion d'outillage sont le taux de disponibilité et le taux d'utilisation des outils. Denkena et al. (2014) indiquent que l'acquisition de données relatives au taux d'utilisation et à l'état des outils maximise la performance en gestion d'outillage. De plus, le niveau d'inventaire des outils est considéré comme une variable pertinente (Schaupp et al., 2017).

2.2 Jumeau numérique

L'augmentation de la recherche sur les jumeaux numériques depuis plusieurs années mène à une compréhension différente de cette technologie. Samuel et al. (2024) indiquent qu'une confusion est présente autour du concept de jumeau numérique, puisque les attentes des industries sont différentes. En effet, ces auteurs ont recensé onze applications attendues lors de l'implantation d'un jumeau numérique. Pour mieux comprendre cette technologie, des auteurs proposent de diviser la technologie en niveaux de maturité. Kritzinger et al. (2018) proposent un modèle à trois niveaux alors que Julien et Martin (2021) et Metcalfe et al. (2023) proposent de diviser le jumeau numérique dans des modèles à cinq niveaux. La simulation peut être utilisée pour simuler l'effet d'un jumeau numérique sur un plancher de production. Bergeron et al. (2023) utilisent la simulation pour évaluer l'effet d'une ombre numérique. De leur côté, Kim et al. (2008) utilisent la simulation pour comprendre l'effet de l'ajout de la technologie d'identification par radio-fréquences (RFID).

2.2.1 Niveaux de maturité du jumeau numérique

Metcalfe et al. (2023) présentent un modèle qui divise le jumeau numérique en cinq niveaux de maturité. Les auteurs considèrent également un niveau de maturité 0 qui représente une simulation qui représente le plancher de production dépourvue de technologies (Metcalfe et al., 2023). Ces niveaux de maturité sont présentés selon la capabilité de la technologie utilisée. Le premier niveau de maturité est le jumeau descriptif (*status twin*) qui permet l'acquisition de données. Le second niveau de maturité est le jumeau informatif (*informative twin*) qui permet de comprendre l'état du système. Le troisième niveau est le jumeau prédictif (*predictive twin*) qui prédit certains comportements du système. Le quatrième niveau de maturité, le jumeau optimal (*optimisation twin*), propose une solution optimale. Le dernier niveau de maturité est le jumeau autonome (*autonomous twin*) qui prend et exécute les décisions (Metcalfe et al., 2023). Samuel et al. (2024) présentent l'application potentiel des niveaux de maturité dans un contexte de gestion d'outillage. Dans le premier niveau, l'outil est localisé dans une zone de l'usine. Dans le second niveau, le temps restant d'utilisation de l'outil peut être estimé. La durée de vie de l'outil est également estimée par le temps total d'utilisation depuis son acquisition. Le jumeau prédictif anticipe les pénuries d'outil. Il intègre également le partage d'outil entre les postes. Le jumeau optimal permet d'optimiser la séquence de production selon la disponibilité et l'emplacement des outils. Le dernier niveau de maturité permet d'identifier les outils requis à chaque poste et enclenche le processus d'approvisionnement du poste.

2.3 Le jumeau numérique en gestion d'outillage

Xie et al. (2021) et Samuel et al. (2023) avancent qu'il y a peu de recherche sur l'utilisation d'un jumeau numérique dans un contexte de gestion d'outillage. Samuel et al. (2024) concluent qu'il serait pertinent d'appliquer différents niveaux de maturité dans un contexte de gestion d'outillage.

3 METHODOLOGIE

3.1 Cas d'application

L'usine-laboratoire du Centre National Intégré du Manufacturier Intelligent (CNIMI) est utilisée comme cas d'application pour tester la performance de la gestion d'outillage lors de l'application des niveaux de maturité d'un jumeau numérique. Ayant un aménagement de type atelier (*jobshop)*, certains outils se trouvent en partage entre plusieurs machines.
Dans le cadre de cette recherche, le produit étudié est une remorque permettant d'y installer une roulotte. Un seul modèle de remorques est fabriqué. La figure 1 présente le schéma de précédences de la production de la remorque. Pour la fabrication de la remorque, neuf machines distinctes sont nécessaires. Certaines de ces machines sont dupliquées. Sur ces neuf

machines, huit outils sont partagés. Ces outils partagés sont entreposés dans un magasin centralisé lorsqu'ils ne sont pas utilisés.

3.2 Description de la problématique

Actuellement, il n'y a aucune gestion d'outillage sur le plancher de production de l'usine-laboratoire. Les outils nécessaires à la production sont remisés dans le magasin. Lorsqu'un employé a besoin d'un outil, il part le chercher au magasin. Après l'utilisation, il arrive que l'employé ne rapporte pas immédiatement l'outil et dans certains cas, l'outil n'est jamais retourné au magasin.

Ne sachant pas qui a emprunté l'outil et l'endroit où l'outil a été laissé, le temps de recherche dans le magasin et sur le plancher de production est élevé. Un appel à tous doit parfois être fait pour trouver un outil, ce qui nuit à la productivité. Certains outils peuvent même être perdus. De ce fait, l'inventaire est également affecté, puisqu'un outil peut être commandé s'il n'est pas trouvé rapidement sur le plancher. De plus, les outils critiques sont conservés en plusieurs exemplaires afin d'éviter les pénuries, ce qui représente un coût important.

3.3 Variables et niveaux des variables

Pour le modèle de simulation, les variables dépendantes choisies sont le temps d'attente des employés, le temps de déplacement des employés et le taux d'utilisation des outils.

Le temps d'attente (Y_1) représente le temps où un employé est en attente d'un outil. Les outils peuvent être emprunter au magasin uniquement.

Le temps de déplacement (Y_2) représente le temps que prend un employé pour se déplacer entre un poste de travail et le magasin. Ce temps est considéré lorsque l'employé retourne un outil, emprunte un outil ou s'il se dirige vers son prochain poste de travail.

Le taux d'utilisation (Y_3) des outils représente la proportion du temps où l'outil est utilisé par rapport au temps total disponible. Lorsqu'un outil se trouve à l'extérieur du magasin, il est considéré en utilisation. Lorsque l'outil revient au magasin, qu'il soit rangé ou qu'il soit placé dans la zone de retour, il n'est pas considéré en utilisation. De plus, cette variable est mesurée seulement pour les outils qui ont une grande valeur. Celle-ci aide à la décision quant au nombre optimal d'outils à conserver en inventaire.

Les variables indépendantes utilisées sont le niveau de maturité du jumeau numérique et le nombre d'outils disponibles pour chaque type. Ces deux variables varient selon différents niveaux afin d'observer le comportement des variables dépendantes énoncées précédemment. La variable du niveau de maturité du jumeau numérique possède deux niveaux, soit X_0 et X_1, suivent les niveaux de maturité énoncé dans le modèle des niveaux de maturité du jumeau numérique présenté par Metcalfe et al. (2023). X_0 correspond à un plancher de production dépourvu de technologie, alors que X_1 correspond à un plancher de production avec une technologie de traçabilité par zone.

La variable du nombre d'outils disponibles permet de modifier la quantité d'outils disponibles en inventaire. En modifiant ces quantités, il est possible de tester différents nombres d'outils à conserver, en ayant plus ou moins d'impact sur la productivité des employés et sur la disponibilité des outils.

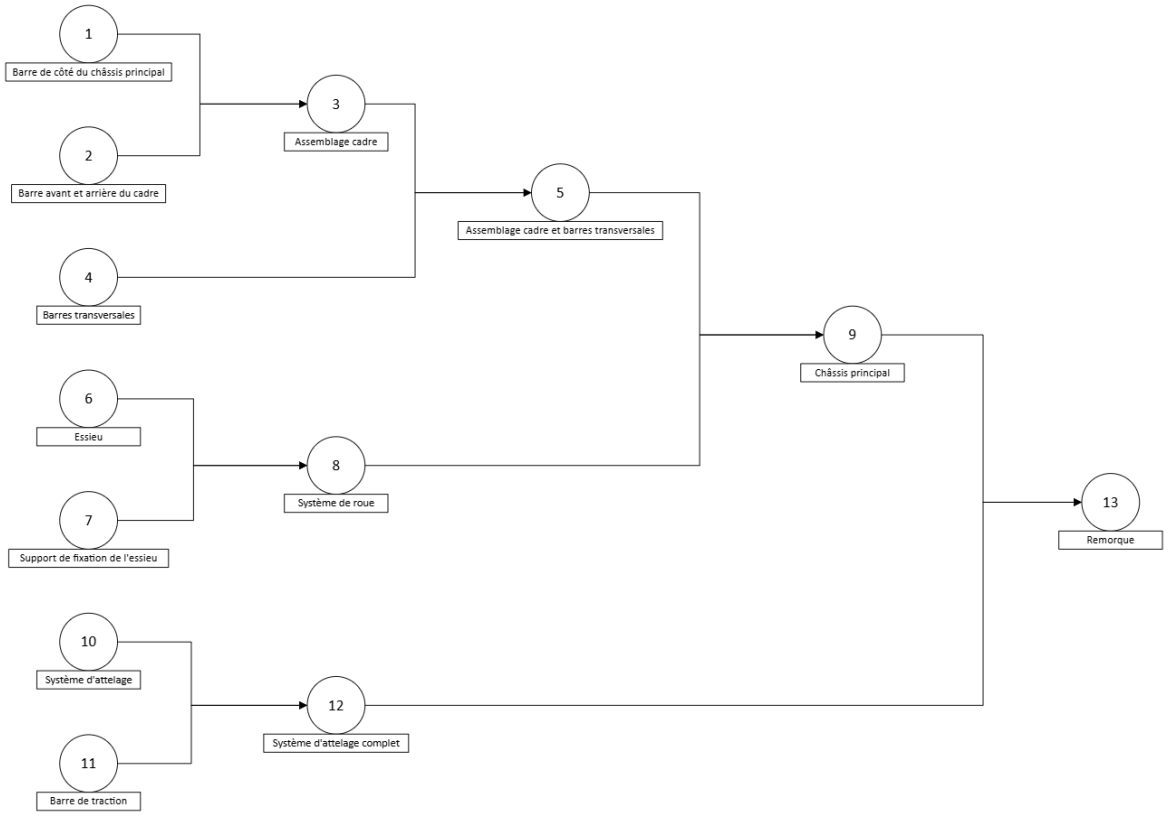


Figure 1 : Diagramme des précédences de la remorque

3.4 Données d'entrée

Plusieurs données d'entrée sont utilisées pour alimenter la simulation. Entre autres, la distance entre les postes de travail est toujours fixe. De plus, la vitesse à laquelle les employés se déplacent entre les différents postes et vers le magasin est constante et fixée à 1,5 mètre/seconde.

Pour la fabrication de la remorque, le diagramme des opérations indique les différentes tâches nécessaires pour fabriquer chaque pièce. Pour chacune de ces tâches, le temps d'installation de l'outil, le temps d'opération et le temps pour retirer l'outil sont fournis. Finalement, le temps de discussion entre l'employé et le magasinier est fixé.

Certaines hypothèses sont posées pour simplifier le modèle de simulation :

- l'ordre des tâches pour la production de chaque pièce n'est pas interchangeable ;
- l'employé transporte avec lui les matières premières pour chaque pièce ;
- les étapes d'assemblage final et d'expédition sont exclues du modèle puisqu'elles n'utilisent aucun outil et elles sont effectués par d'autres employés ;
- l'horaire des employés est de 8h à 17h ;
- la maintenance des machines n'a pas d'influence sur la gestion d'outillage ;
- le déplacement des employés est mesuré selon la distance euclidienne entre les postes ;
- il y a 10 employés dans l'usine ;
- chaque fois qu'une commande termine au poste d'expédition, une nouvelle commande est lancée dans l'usine.

3.5 Simulation

Pour répondre à l'objectif de cet article, les deux premiers niveaux de maturité du jumeau numérique, soit X_0 et X_1, sont modélisés. La simulation de ces deux niveaux a été réalisée à l'aide du logiciel Simio. Il s'agit d'un horizon infini, étant donné que le système n'a pas besoin d'être vidé à la fin de chaque quart de travail.

La figure 2 présente le schéma de simulation pour le scénario X_0. Ce schéma présente les différentes étapes à réaliser lors de l'exécution de la simulation. Le lancement d'une commande client est l'élément déclencheur de la simulation. Cet événement vient créer une entité qui parcourra le processus de fabrication. Pour des fins de simplification, l'entité générée est considérée comme l'employé qui se promène avec un chariot contenant toute la matière première requise à la réalisation de la commande. Dès son entrée dans le système, l'employé se fait attribuer la pièce avec laquelle il commence la fabrication. L'employé se déplace jusqu'au magasin d'outillage pour emprunter les outils pour toutes les tâches liées à sa pièce. La nomenclature (*bill of material*) indique les bons outils à emprunter pour chaque tâche. Le magasinier se déplace dans le magasin pour aller chercher les outils. Lorsque l'outil n'est pas disponible, l'employé attend. Après avoir trouvé tous les outils nécessaires, le magasinier exécute le processus de sortie d'outils du magasin. Ce processus permet d'identifier l'employé qui emprunte l'outil et le soustraire de l'inventaire du magasin. Pour réaliser sa pièce, l'employé doit réaliser les tâches dans l'ordre de la gamme de fabrication. Ainsi, il se dirige vers la machine requise pour la première tâche. À la fin de chaque tâche, l'employé se questionne à savoir s'il a une autre tâche à faire pour cette pièce. S'il reste une tâche à faire, l'employé se dirige vers la bonne machine. S'il a terminé sa pièce, il se dirige vers

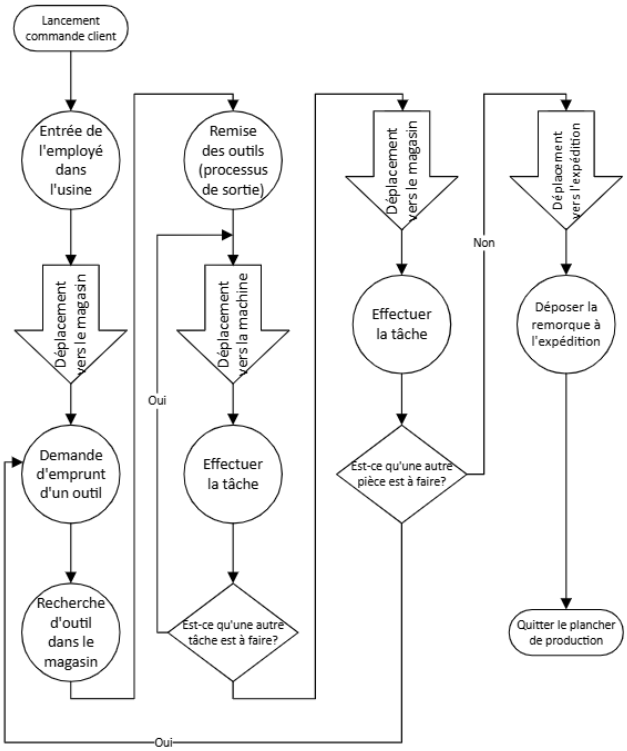


Figure 2 : Cartographie de processus - Scénario X_0

le magasin pour retourner ses outils. Après avoir retourné ses outils, l'employé se questionne à savoir s'il reste des pièces à fabriquer. S'il reste des pièces à fabriquer, il se dirige vers le comptoir du magasin et le processus recommence. Dans le cas contraire, il se dirige vers l'expédition pour y déposer ses pièces.

La figure 3 présente le schéma de simulation pour le scénario X_1. Dans ce scénario, une technologie de traçabilité pour localiser les outils est ajoutée. Cette technologie permet d'identifier la zone dans laquelle se situe chaque outil et de rendre disponible cette information à chaque employé. Les étapes jusqu'à la demande d'emprunt d'outil au magasin sont identiques au scénario X_0. Lorsque le magasinier cherche les outils dans le magasin, il est assisté d'un système de traçabilité qui indique l'emplacement où l'outil est entreposé. Le temps de recherche d'outil par le magasinier est ainsi diminué. Le processus de sortie de l'outil est associé au système de traçabilité, ce qui permet d'identifier automatiquement l'employé qui a retiré l'outil du magasin. L'inventaire du magasin est mis à jour et l'emplacement de l'outil est spécifié par la zone de l'usine dans laquelle il se retrouve. La visibilité des outils sur le plancher de production est plus précise que le scénario X_0. Ayant cette visibilité, si les outils ne sont pas disponibles, l'employé modifie la prochaine pièce à exécuter. Le processus d'utilisation des outils ainsi que le retour au magasin restent identiques au scénario X_0.

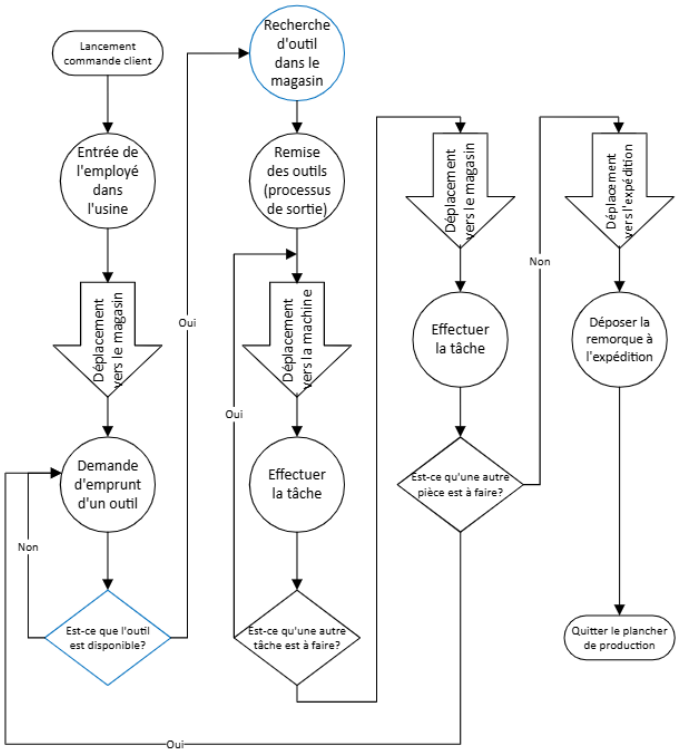


Figure 3 : Cartographie de processus - Scénario X_1

3.6 Validation et évaluation du temps de réchauffement

Le modèle a été vérifié et validé afin d'assurer que la simulation se comporte tel que défini. Une stratégie de vérification en quatre étapes a été réalisée : 1) vérifier des messages d'erreurs, 2) vérifier les variables d'états utilisées, 3) vérifier la modélisation de chaque objet et 4) vérifier le comportement des entités et du système.

Une fois la simulation réalisée, les indicateurs de performance ont été comparés à ceux attendus théoriquement afin de valider le modèle, notamment le nombre de remorques fabriquées et le temps de processus des postes de travail.

Le temps de réchauffement a été évalué en traçant le graphique du temps de passage de chaque remorque sur une période de 60 jours, soit 1 440 heures. Une diminution de la variabilité a été observée après 427 heures. Afin d'assurer la stabilité des résultats, le temps total de simulation est établi à 2 135 heures, excluant le temps de réchauffement.

4 RESULTATS

Une fois la simulation terminée et validée, celle-ci est lancée pour obtenir les résultats. Un niveau de confiance de 95% est utilisé dans les paramètres d'expérience de la simulation. La simulation a été lancé pour une durée de 2 135 heures. Les indicateurs de performances choisis sont le temps d'attente total de l'employé, le temps de déplacement de l'employé pour la fabrication d'une remorque complète, le taux d'utilisation des outils et leur taux d'utilisation réel. Le taux d'utilisation correspond au temps que l'outil a été en possession d'un employé, tandis que le taux d'utilisation réel correspond au temps que l'outil a réellement été utilisé sur la machine.

Le plan d'expérience généré pour les deux niveaux de maturité calcule l'effet sur les indicateurs de performance par rapport à une diminution d'inventaire. Débutant par la disponibilité de tous les outils de l'inventaire initial, cinq diminutions sont apportées (90%, 80%, 60%, 50% et 30%). Aucune expérience sous 30% de l'inventaire initial est évalué, puisque certains outils atteignent alors le seuil minimum d'un seul outil disponible.

Ces expériences sont d'abord réalisées pour le niveau de maturité X_0. Le taux d'utilisation moyen ainsi que le taux d'utilisation réel moyen des huit outils utilisés sont calculés. Le temps d'attente moyen pendant la fabrication est de 5,3 heures. Le temps de déplacement moyen pendant la fabrication est de 0,7 heure.

Ces expériences sont conduites une seconde fois considérant le niveau de maturité X_1. Les diminutions de quantités d'outils en inventaire sont identiques aux expériences réalisées pour X_0. Le paramètre lié au niveau de maturité est modifié afin que le processus décisionnel reflète l'ajout de la traçabilité sur les outils. Le temps d'attente moyen pendant la fabrication est de 4,3 heures. Le temps de déplacement moyen pendant la fabrication est de 0,7 heure.

Les figures 4 et 5 présentent la comparaison des résultats du taux d'utilisation moyen ainsi que le taux d'utilisation réel moyen selon les deux niveaux de maturité, en fonction de l'inventaire disponible.

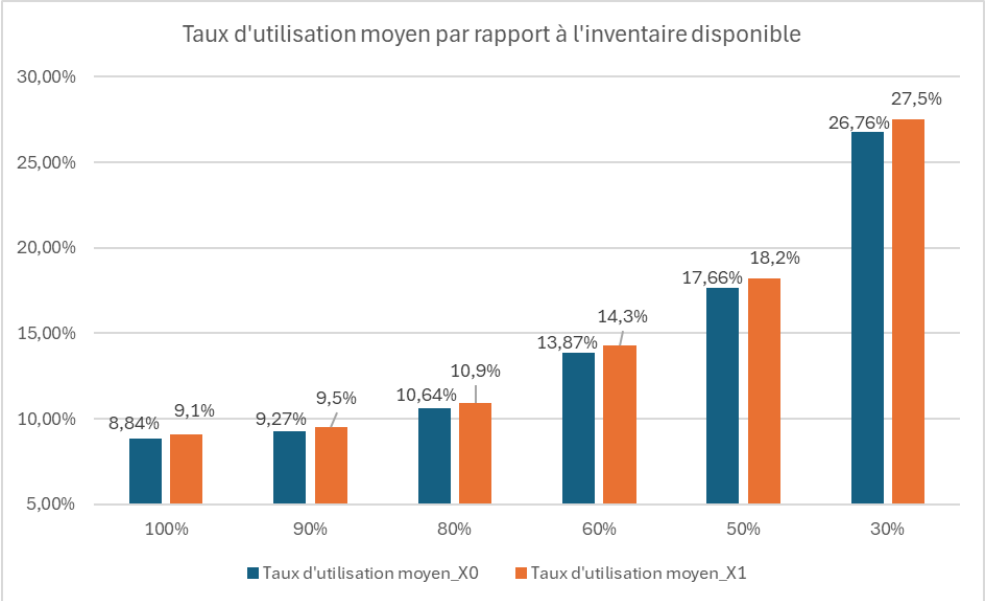


Figure 4 : Taux d'utilisation moyen par rapport à l'inventaire disponible

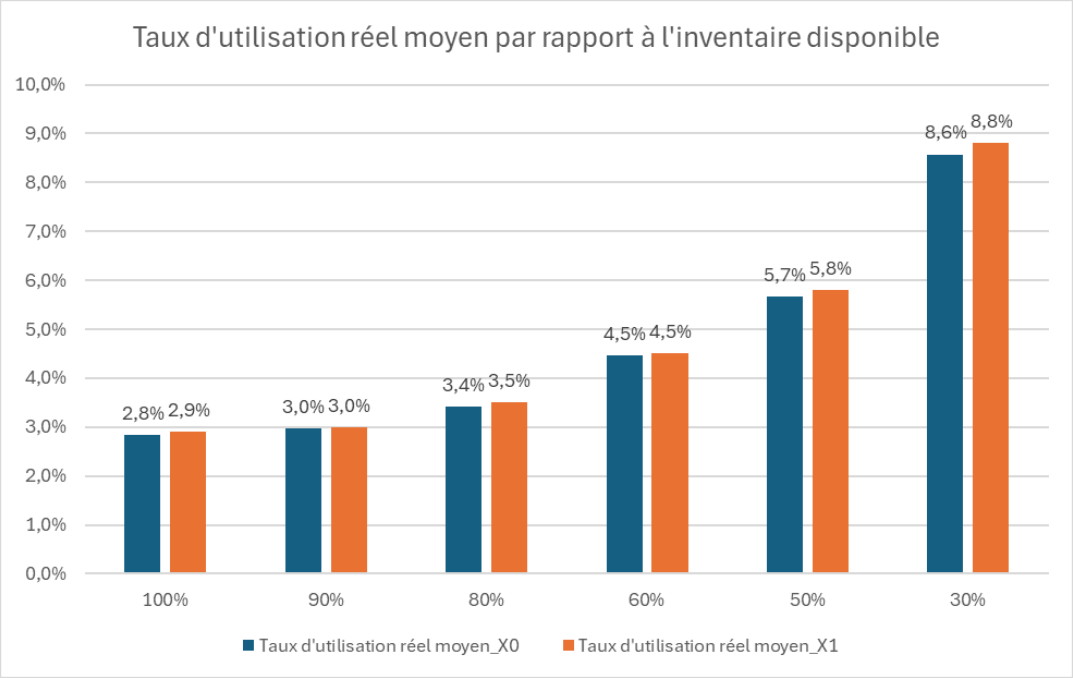


Figure 5 : Taux d'utilisation réel moyen par rapport à l'inventaire disponibles

5 DISCUSSION

La simulation permet d'obtenir des résultats préliminaires afin d'observer l'effet de l'ajout d'une technologie de traçabilité par zone sur la gestion d'outillage. Les expériences permettent de varier la quantité d'outil disponible en modifiant l'inventaire de départ. Il s'agit d'une variation d'inventaire global et non individuel pour chaque outil. De ce fait, il n'est pas possible de passer sous les 30% de l'inventaire de départ puisque certains outils se retrouvent en quantité unitaire. Cette analyse met en évidence une répartition inégale des besoins en outillage.

Dans un premier temps, les expériences permettent d'évaluer l'effet de la diminution d'inventaire sur les indicateurs de performance pour chaque niveau de maturité. Ceux liés à la productivité soit le temps d'attente et le temps de déplacement ne varient pas en fonction du nombre d'outil disponible au magasin. D'un autre côté, le taux d'utilisation et le taux d'utilisation réel des outils vont varier.

L'absence de variation du temps d'attente s'explique par le manque de rareté des outils critiques. Diminuer l'inventaire globalement crée une rareté pour des outils qui ne sont pas critiques. Ainsi, l'inventaire de plusieurs outils, critiques ou non, restent disponible en grande quantité. De ce fait, le temps d'attente est similaire pour tous les employés.

L'absence de variation du temps de déplacement s'explique par le nombre de modèle de remorque disponible. La présence d'un seul modèle de remorque dans la modélisation implique que tous les employés réalisent les mêmes étapes avec les mêmes temps de production. Les allers-retours entre le magasin et les postes de travail sont également identiques. Ainsi, la distance parcourue et le temps de déplacement est identique pour tous les employés.

Une augmentation du taux d'utilisation et du taux d'utilisation réel est observable lorsque l'inventaire est réduit. Étant donné l'inventaire de départ surdimensionné, l'augmentation des taux d'utilisation est inévitable. Le taux d'utilisation moyen qui est inférieur à 30% dans les deux scénarios permet de conclure que malgré une diminution d'inventaire de 70% certains outils sont toujours en trop grande quantité. Le taux d'utilisation réel moyen est inférieur à 10% pour les deux scénarios. Ainsi, l'outil est utilisé moins de 10% du temps dans un contexte de valeur ajoutée.

Il devient intéressant de comparer les niveaux de maturité afin d'évaluer si l'ajout d'une technologie de traçabilité permet d'améliorer la gestion d'outillage. Une variation est observable pour chacun des indicateurs de performances.

L'ajout d'un système de traçabilité sur l'outillage réduit le temps d'attente des employés de 18,9%. Connaissant l'emplacement approximatif des outils dans l'usine, l'employé peut changer de pièce à fabriquer lorsque le magasinier mentionne l'indisponibilité d'un outil. Ce changement est possible puisque le magasinier à une vue d'ensemble de l'inventaire des outils ainsi que le positionnement de ceux-ci dans le magasin et dans l'usine. Sans le système de traçabilité, l'employé doit attendre que l'outil dont il a besoin revienne au magasin.

Le temps de déplacement est identique entre les deux scénarios, soit de 0,7 heures. Aucune amélioration est observée par rapport au cet indicateur puisque la distance entre les postes ne varie pas.

Le graphique comparant le taux d'utilisation moyen (Figure 4) présente qu'il y a une augmentation par rapport à la diminution de l'inventaire. Cette augmentation n'est pas identique pour chaque variation d'inventaire. Cependant, une légère augmentation est toujours présente entre le scénario X_0 et le scénario X_1. La plus grande variation observable est de 0,74% lorsque l'inventaire représente 30% de celui de départ. L'augmentation observable lors de l'implantation d'une technologie de traçabilité, malgré qu'elle soit petite, permet d'établir qu'il y a une amélioration sur l'utilisation des outils. Ainsi, le temps de possession de chaque outil par un employé diminue. Le niveau d'inventaire et la présence d'un seul modèle de remorque peut influencer ce faible taux d'augmentation dû à une faible variabilité.

Le taux d'utilisation réel moyen (Figure 5) présente une augmentation lors de l'implantation de X_1 par rapport au scénario X_0 pour un inventaire de 30%. Cependant, pour certains niveaux d'inventaire le taux d'utilisation réel moyen est identique. Cet indicateur représente le temps que l'outil passe sur la machine directement. Étant donné que les temps de fabrication ne changent pas d'un employé à l'autre, le taux

d'utilisation réel ne devrait pas changer malgré la présence d'une technologie de traçabilité. Par l'analyse du graphique (Figure 5), la plus grande augmentation observée est de 0,2%. Cette variation provient du modèle de simulation et non de l'ajout d'une technologie de traçabilité.

La simulation de ces deux premiers niveaux de maturité permet d'évaluer le potentiel dans un contexte de gestion d'outillage. L'absence de variabilité par l'utilisation d'un seul modèle de remorque ne permet pas de conclure définitivement sur l'effet de l'ajout de la traçabilité sur la gestion d'outillage. Cependant, par ces résultats préliminaires il est possible de conclure qu'il y a une amélioration entre le scénario X_0 et X_1. De ce fait, il est intéressant de poursuivre les recherches sur l'utilisation des niveaux de maturité dans un contexte de gestion d'outillage.

5.1 Limite de l'étude

Cette étude présente certaines limites, notamment le contexte d'usine-laboratoire limite les événements imprévus qu'une usine réelle peut subir. Une autre limite significative est qu'un seul modèle de remorque est intégré. Une plus grande diversité de produits pourrait modifier considérablement l'utilisation des outils. De plus, il n'est pas commun qu'une entreprise propose un seul produit ainsi qu'un seul modèle de celui-ci.

5.2 Travaux futurs et opportunités de recherche

Plusieurs travaux seront réalisés afin d'évaluer l'utilisation du jumeau numérique pour améliorer la gestion d'outillage. La première étape est d'ajouter au minimum un modèle de remorque supplémentaire, ce qui permettra d'accroître la diversité des outils utilisés et partagés. Ceci reproduira plus fidèlement la réalité d'un environnement manufacturier. Cette approche visera à mieux comprendre l'impact de la variété des produits sur la gestion et l'utilisation des outils en production.

La deuxième étape est de trouver le seuil optimal de chaque outil pour le scénario 0, tout en conservant une production fluide. Cette étape identifiera un niveau d'inventaire qui minimisera l'immobilisation des ressources sans impacter la productivité.

La troisième étape est d'intégrer un deuxième niveau de maturité du jumeau numérique pour évaluer l'impact sur la gestion d'outillage. Celui-ci permettra la localisation exacte des outils dans l'usine. Il sera possible d'estimer le temps d'utilisation restant de l'outil par rapport à sa position. Il sera également possible d'estimer la durée de vie des outils par son taux d'utilisation et les données historiques. Par une approche de simulation, chaque niveau sera modélisé en considérant un niveau d'inventaire initial constant.

La dernière étape est d'analyser les résultats des indicateurs de performance. Des conclusions seront tirées afin de déterminer si les niveaux de jumeau numérique ont un effet significatif sur la gestion d'outillage en entreprise.

Plusieurs opportunités de recherche sont possibles à la suite de ce projet. La première opportunité est de reproduire ce projet dans le contexte et avec les données d'une entreprise réelle de fabrication de remorque. Il serait possible d'évaluer l'effet des facteurs externes présent dans les entreprises sur la performance du système de gestion d'outillage. La deuxième opportunité est d'étendre la méthodologie à d'autres types d'industries. Afin de vérifier la possibilité de généralisation. La troisième opportunité est d'intégrer les niveaux de maturité plus avancé du jumeau numérique.

6 CONCLUSION

Cet article démontre la pertinence d'une gestion d'outillage basée sur les données de localisation des outils. Pour évaluer la performance de la gestion d'outillage, certains indicateurs de performances sont identifiés et mesurés. De plus, il est établi par plusieurs auteurs que l'Industrie 4.0 peut jouer favorablement dans la mise en place d'une bonne gestion d'outillage. Le jumeau numérique est identifié comme une technologie à évaluer pour améliorer la gestion d'outillage. Un modèle de niveau de maturité est présenté considérant l'application potentiel pour la gestion des outils.

Cet article compare par simulation les performances en gestion d'outillage pour deux niveaux de maturité (X_0 et X_1). Pour ce faire, un cas d'application de fabrication de remorque dans un atelier manufacturier est présenté en collaboration avec l'usine-laboratoire du CNIMI. L'absence de gestion d'outillage dans cette usine entraine la recherche et la perte de certains outils lors de la production. La simulation du plancher de production permet d'évaluer les possibilités d'amélioration par rapport à la gestion d'outillage actuelle. Les résultats de la simulation permettent de conclure qu'il y a une amélioration entre le niveau de maturité X_0 et X_1, autant au niveau du temps d'attente que du temps de déplacement des employés, ainsi que du côté du taux d'utilisation des outils.

7 REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le CNIMI et les partenaires industriels pour leur collaboration ainsi que pour leur soutien financier, en partenariat avec Mitacs et le CRSNG.

8 REFERENCES

Bergeron, E., Audy, J. F., & Forget, P. (2023). Visibility Performance Assessment: Simulation of a Digital Shadow in a Port [Article]. *Journal of Marine Science and Engineering*, *11*(5), Article 927. https://doi.org/10.3390/jmse11050927

Darányi, A., Dörgő, G., Ruppert, T., & Abonyi, J. (2022). Processing indoor positioning data by goal-oriented supervised fuzzy clustering for tool management [Article]. *Journal of Manufacturing Systems*, *63*, 15-22. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.02.010

Denkena, B., Krüger, M., & Schmidt, J. (2014). Condition-based tool management for small batch production [Article]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *74*(1-4), 471-480. https://doi.org/10.1007/s00170-014-6013-2

Julien, N., & Martin, E. (2021). How to characterize a digital twin: A usage-driven classification. IFAC-PapersOnLine,

Kim, J., Tang, K., Kumara, S., Yee, S. T., & Tew, J. (2008). Value analysis of location-enabled radio-frequency identification information on delivery chain performance [Article]. *International Journal of Production Economics*, *112*(1), 403-415. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.04.006

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine,

Lee, C. K. M., Lv, Y., Ng, K. K. H., Ho, W., & Choy, K. L. (2018). Design and application of internet of things-based warehouse management system for smart logistics [Article]. *International Journal of Production Research*, *56*(8), 2753-2768. https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1394592

Metcalfe, B., Boshuizen, H., Bulens, J., & Koehorst, J. (2023). Digital twin maturity levels: a theoretical framework for defining capabilities and goals in the life and

environmental sciences [version 1; peer review: 3 approved with reservations]. *F1000Research*, *12*(961). https://doi.org/10.12688/f1000research.137262.1

Samuel, C., Forget, P., Audy, J.-F., & Gaudreau, M.-A. (2024). Enhancing Operational Management of Shared Tools in a Job Shop with Digital Twins. *IISE Annual Conference. Proceedings*, 1-6. https://doi.org/https://doi.org/10.21872/2024IISE_7991

Samuel, C., Forget, P., Audy, J.-F., Gaudreau, M.-A., Bourgeois, Y., & Dupuis, M. (2023). Perspectives sur l'utilisation du jumeau numérique pour améliorer la gestion de l'outillage dans un atelier manufacturier.

Schaupp, E., Abele, E., & Metternich, J. (2017). Potentials of Digitalization in Tool Management. Procedia CIRP,

Schreiber, M., Weisbrod, N., Ziegenbein, A., & Metternich, J. (2023). Tool management optimisation through traceability and tool wear prediction in the aviation industry [Article]. *Production Engineering*, *17*(2), 185-195. https://doi.org/10.1007/s11740-023-01194-7

Shicong, P., Guocheng, W., & Fuqiang, T. (2022). Design and realization of CNC machine tool management system using Internet of things [Article]. *Soft Computing*, *26*(20), 10729-10739. https://doi.org/10.1007/s00500-022-06936-w

Shimada, T., & Suwa, H. (2021). Optimization of cutting tool allocation to enhance workload balance and total completion time in parallel-type FMS [Article]. *International Journal of Automation Technology*, *15*(6), 804-812. https://doi.org/10.20965/ijat.2021.p0804

Stoldt, J., Trapp, T. U., Toussaint, S., Süße, M., Schlegel, A., & Putz, M. (2018). Planning for Digitalisation in SMEs using Tools of the Digital Factory. 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems, CIRP CMS 2018,

Svinjarević, G., Stoić, A., & Kopač, J. (2007). Implementation of cutting tool management system. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, *23*(1), 99-102.

Xie, Y., Lian, K., Liu, Q., Zhang, C., & Liu, H. (2021). Digital twin for cutting tool: Modeling, application and service strategy [Article]. *Journal of Manufacturing Systems*, *58*, 305-312. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.08.007

CIGI QUALITA MOSIM 2025

A Two-Stage Robust Approach to Mitigating Supply Chain Disruptions with Pre-Positioned Inventory.

MATTHIEU GODICHAUD, HASAN MURAT AFSAR, YASSINE OUAZENE [1]

[1] Computer Sciences and Digital Society Laboratory (LIST3N),University of Technology of Troyes (UTT), Troyes, France
{matthieu.godichaud, murat.afsar, yassine.ouazene}@utt.fr

Abstract – Resilience in supply chains is increasingly becoming as critical as efficiency and cost reduction. This work investigates pre-positioned inventory as mitigation strategy of supplier disruptions in multi-products assembly supply chain. We consider three level supply chain with component suppliers at upstream level, assembly factories at intermediate level and retailers that faced demands at downstream level. The model is related to intertwined network by considering multi-products and component commonalities. A robust model is proposed to find the best positioning of inventory of products and components with respect to a given budget uncertainty. Supplier disruptions are modeled as capacity losses caused by disruptions. The planning horizon is divided into periods, where a disruption results in one or more suppliers experiencing a loss of capacity for a certain number of periods. This approach enables the modeling of partial disruptions rather than assuming a complete loss of capacity over the entire planning horizon. The problem is solved using a column-and-constraint generation method. The master problem determines inventory level decisions across a set of scenarios, while the subproblem solves a min-max flow allocation problem based on given inventory levels. The proposed method is evaluated using a set of randomly generated instances.

Keywords – **Robust Optimisation, Supply Chain Planning, Resilience, Column and Constraint Generation.**

Résumé – La résilience des chaînes logistiques est devenue tout aussi cruciale que l'efficacité et la réduction des coûts. Ce travail étudie l'utilisation du pré positionnement de stock comme stratégie d'atténuation des perturbations dans des réseaux logistiques d'assemblage multi-produits. Des réseaux logistiques à trois niveaux sont considérés, avec des fournisseurs de composants en amont, des usines d'assemblage en intermédiaire et des distributeurs confrontés à la demande en aval. Le modèle s'inscrit dans un réseau interconnecté en prenant en compte des produits multiples et des composants communs entre produits. Un modèle robuste est proposé afin de déterminer le meilleur positionnement des stocks de produits et de composants en tenant compte d'un budget d'incertitude. Les perturbations chez les fournisseurs sont modélisées en décomposant l'horizon de planification en périodes. Une perturbation correspond à un nombre de périodes pendant lesquelles un ou plusieurs fournisseurs ne peut plus livrer de composants. Le problème est résolu à l'aide d'une méthode de génération de colonnes et de contraintes. Le problème maître détermine les décisions de stockage sur plusieurs scénarios, tandis que le sous-problème résout un problème d'allocation de flux min-max en fonction des niveaux de stock donnés. La méthode est évaluée sur un ensemble d'instances générées aléatoirement.

Mots clés **- Optimisation robuste, Chaîne logistique, Résilience, Génération de Colonnes et Constraintes**

CIGI QUALITA MOSIM 2025

Energy-Efficient Distribution Inventory Optimization in the Cold Supply Chain

HONG-NGUYEN NGUYEN1 , MATTHIEU GODICHAUD[2] , LIONEL AMODEO[2]

[1] The University of Danang - University of Science and Technology,
54 Nguyen Luong Bang, Danang, Vietnam
nhnguyen@dut.udn.vn

[2] Computer Sciences and Digital Society Laboratory (LIST3N), University of Technology of Troyes,
Troyes Cedex, 10004, France
matthieu.godichaud@utt.fr, lionel.amodeo@utt.fr

***Abstract* –** Efficient energy management in the cold supply chain is crucial for reducing costs and environmental impact. This study presents an integrated distribution inventory system that focuses on energy considerations throughout the supply chain. The model incorporates energy usage from production, warehousing, and transportation processes into the average total cost of the system, providing a comprehensive analysis of energy cost components. By considering various factors such as production rate, ordering policy, warehouse filling level, and truck types, the model offers insights into the energy efficiency of the system. The model is formulated as a mixed-integer nonlinear programming (MINLP) problem. To solve this problem, a heuristic algorithm is proposed aims to optimize the total cost, including energy costs, while providing near-optimal decision variables. A study based on a real-world company serves as a practical illustration of the model's effectiveness. A comparison between the integrated inventory system and a non-inventory system reveals significant reductions in energy consumption for warehousing and the overall system costs. A comparative analysis with a commercial solver on four groups of datasets demonstrates the efficiency of the proposed heuristic. Sensitivity analyses are performed to assess the impact of key parameters such as energy unit costs, distance, transportation speed, and demand on energy costs and system performance. These analyses provide valuable insights for decision-makers, supporting informed decision-making and the identification of practical strategies for optimizing energy usage.

Keywords: Multi-echelon Inventory System, Energy Efficiency, Mixed-integer Nonlinear Programming, Supply Chain Management, Joint Economic Lot-sizing.

***Résumé* –** La gestion de l'énergie dans les chaînes logistique pour des produits frais ou réfrigérés est essentielle pour réduire les coûts et l'impact environnemental. Ce travail concerne l'étude de la gestion des stocks et de l'énergie dans des chaînes logistiques de distribution. Le modèle intègre différente composantes du coût énergétique avec la consommation énergétique des processus de production, d'entreposage et de transport dans le coût total moyen du système. En prenant en compte divers facteurs tels que le taux de production, la politique de commande, le niveau de remplissage des entrepôts et les types de camions, le modèle fournit des informations sur l'efficacité énergétique du système. Il est formulé comme un problème de programmation non linéaire en nombres entiers mixtes (MINLP). Une heuristique est proposée pour résoudre le problème. Une étude basée sur une entreprise réelle illustre l'efficacité du modèle. Une comparaison entre le système intégré de gestion des stocks et un système sans gestion des stocks met en évidence les réductions possibles de la consommation d'énergie pour l'entreposage et du coût global. Une analyse comparative avec un solveur commercial sur quatre groupes de jeux de données démontre l'efficacité de l'heuristique proposée. Des analyses de sensibilité sont réalisées afin d'évaluer l'impact de paramètres clés tels que les coûts unitaires de l'énergie, la distance, la vitesse de transport et la demande sur les coûts énergétiques et la performance du système.

Mot clés : Chaîne logistique, Stock multi-échelon, Efficacité énergétique, Programmation non-linéaire en nombre mixte, Dimensionnement de lots.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Wood Supply Management for Pulp and Paper Mills: A Literature Review

HOMAYOUNI ZAHRA, LEBEL LUC, LEHOUX NADIA' CLOUTIER CAROLINE

FORAC Research Consortium, Université Laval; Interuniversity Research Centre on Enterprise Networks, Logistics and Transportation (CIRRELT); Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique Université Laval (FFGG)
Zahra.homayouni.1@ulaval.ca; LUC.LEBEL@SBF.ULAVAL.CA; Nadia.Lehoux@gmc.ulaval.ca ; Caroline.Cloutier@gmc.ulaval.ca

***Résumé* – Le secteur de la pâte et du papier fait face à des défis d'approvisionnement qui affectent son efficacité, notamment l'accessibilité des fibres, les contraintes de transport et l'incertitude de l'offre. Les usines de pâte et de papier nécessitent un approvisionnement continu afin d'assurer un mélange homogène d'essences de bois spécifiques pour la production de pâte. La gestion des essences, de la fraîcheur des fibres et des divers fournisseurs de bois ajoute de la complexité, exigeant une logistique optimisée pour maîtriser les coûts et garantir la continuité des opérations. Cette étude propose une revue de la littérature sur les systèmes de mesure de la performance au sein de la chaîne d'approvisionnement forestière, en particulier sur le secteur de la pâte et du papier. S'appuyant sur des recherches antérieures soulignant le besoin d'indicateurs de performance, cet article présente une méthode en quatre étapes pour développer des mesures de performance, incluant les KPI, les facteurs influençant la performance et les stratégies d'amélioration. L'étude identifie les KPI liés aux coûts comme les plus courants et souligne la nécessité d'un cadre d'évaluation plus large, intégrant des stratégies visant à renforcer la résilience, l'agilité et la coordination, soutenues par des techniques avancées d'optimisation et de simulation.**

***Abstract* – The pulp and paper sector faces procurement challenges that impact efficiency, including fiber accessibility, transport constraints, and supply uncertainty. Pulp and paper mills require continuous in-feed deliveries to ensure a consistent mix of specific wood species for pulp production. Managing wood species, fiber freshness, and diverse wood suppliers adds complexity, requiring optimized logistics to control costs and ensure steady mill operations. This study presents a literature review on performance measurement systems within the forest supply chain, specifically focusing on the pulp and paper sector. Building on prior research highlighting the need for supply chain performance metrics, this article presents a four-step method for developing performance measures, including KPIs, factors affecting performance, and strategies for improvement. The study identifies cost-related KPIs as the most common, emphasizing the need for a broader evaluation framework while addressing factors, risks, and uncertainties through strategies focusing on enhancing resilience, agility, and coordination, supported by advanced optimization and simulation techniques to improve the supply chain performance.**

***Mots clés* - Gestion de la chaîne d'approvisionnement forestière ; Industrie des pâtes et papiers ; Revue de la littérature.**

***Keywords* –Forest supply chain management; Pulp and paper industry; Literature review.**

1 INTRODUCTION

Supply chain disruptions have become increasingly prevalent, impacting industries worldwide and exposing critical vulnerabilities. The pulp and paper sector, as a globally significant industry, is particularly susceptible to these disruptions due to its reliance on a complex network of interdependent activities. Key activities include wood sourcing, harvesting, transportation, processing, and distribution. Each of which faces distinct challenges (D'Amours et al., 2014; Carlsson et al., 2009; Philpott & Everett, 2001), such as fiber accessibility, fluctuating feedstock availability, transport capacity constraints, and supplier diversity. Furthermore, the industry may have to manage different wood species (hardwood, softwood), track fiber freshness, and handle multiple raw material variations, which can all complicate logistics, disrupt production, and result in supply-demand mismatches (Utomo, 2021). Addressing these disruptions requires a structured approach that leverages performance indicators to evaluate and improve supply chain efficiency. Key internal factors influencing supply chain performance include operational efficiency, inventory management, and resource allocation, while external factors such as market demand fluctuations, regulatory policies, and environmental concerns play a crucial role in determining supply stability (Rahimi et al., 2021).This research explores how improving the performance of the pulp and paper supply chain requires a holistic approach that integrates key indicators, internal and external factors, and effective strategies and techniques. Covering studies from 2000 to 2023, a systematic literature review was conducted following Moher et al.'s (2015) methodology, analyzing insights from Engineering Village, SCOPUS, and Web of Science. The study examines real-world cases, highlights challenges, and discusses performance monitoring strategies,

offering theoretical insights to enhance decision-making in the pulp and paper sector.

This article is structured as follows. Section 2 presents the methodology used for the literature review. Section 3 gives details about the thematic analysis of supply chain management practices. Section 4 discusses the implications of supply chain management for the pulp and paper sector. Section 5 concludes the paper.

2 RESEARCH METHODOLOGY

This study employed a literature review to examine existing research on the performance of the pulp and paper supply chain. A structured keyword-based search was conducted across three major academic databases: SCOPUS, Web of Science, and Engineering Village, covering the period from 2000 to 2023. The search adhered to the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis (PRISMA) guidelines (Moher et al., 2015), as displayed in Figure 1, to maintain methodological rigor and minimize bias. Boolean keywords searched in Subject/Title/Abstract field combinations such as ('pulp and paper' OR 'wood supply chain' OR 'forest product' OR 'forest supply chain' OR 'value chain') AND ('coordination' OR 'collaboration' OR 'integration') AND ('feedstock delivery' OR 'supply delivery') were used. The selection process began with 7,948 records, from which duplicates (3,754) and irrelevant studies (3,443) were removed through a structured screening process. After further screening, 164 articles were excluded. Only English-language papers were considered. Studies addressing at least one of the following research questions were included: Which indicators should be used to measure the performance of the pulp and paper supply chain? What are the key internal and external factors, as well as challenges, that significantly affect the performance of the pulp and paper supply chain? What are the key strategies and their advantages for improving the pulp and paper supply chain? A total of 124 articles were deemed relevant for in-depth analysis, covering all the key topics outlined in the research questions (Moher et al., 2015). The results section presents findings from the 124 analyzed papers, addressing the research questions.

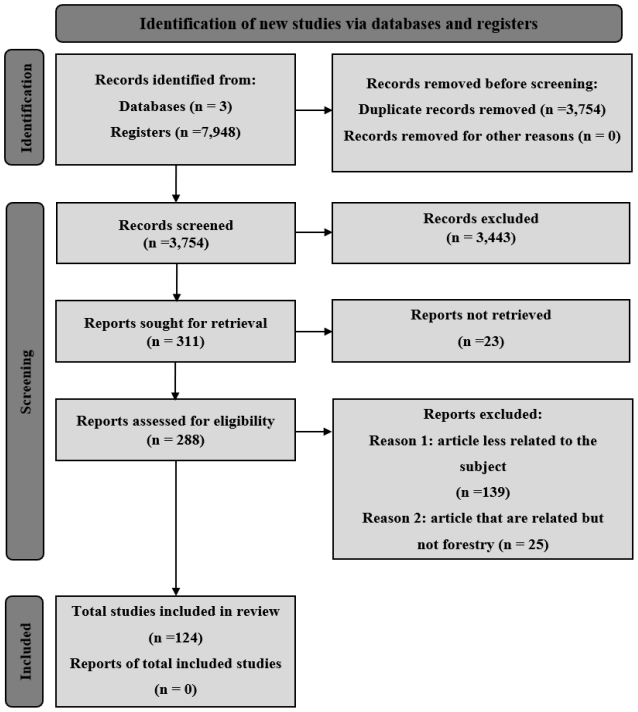


Figure 1. Research process flow diagram, based on PRISMA

3 THEMATIC ANALYSIS

3.1. Which indicators should be used to measure the performance of the pulp and paper supply chain?

Based on the relevant papers examined, it was possible to categorize the performance indicators found into five key categories of indicators: Cost-related indicators, time-related indicators, flexibility-related indicators, quality-related indicators, and other indicators (e.g., environmental and social aspects). Defining Key Performance Indicators (KPIs) helps measure supply chain performance, efficiency, and resources used. These metrics track progress and highlight improvement. By focusing on relevant KPIs, companies can make informed decisions, improve operations, and achieve long-term success on wood supply management and feedstock delivery. The frequency each category was considered in the reviewed papers is presented in Figure 2.

The most frequently mentioned category, cost efficiency, is a fundamental concern in the pulp and paper supply chain, as raw material acquisition, transportation, and processing contribute significantly to total expenses (Vafaeenezhad and Tavakkoli-Moghaddam, 2016; Vafaeenezhad et al., 2019). The most important cost indicators include transportation cost and production cost, while holding/storage cost was considered less critical (Bredström et al., 2004; Lehoux et al., 2010; Ahmadvand et al., 2021). Cost-related performance measures include expenses on materials, products, and services. Financial performance measures track and manage these costs. For example, Rahimi et al. (2020) and Ahmadvand and Sowlati, (2022) studied financial performance by assessing how effectively these costs are managed to improve profitability and reduce financial risks. They utilized optimization models to minimize costs related to materials, logistics, and services while ensuring supply reliability and efficiency in forestry and biomass supply chains.

Secondly, time is a crucial category as it directly affects operational efficiency, customer satisfaction, and competitiveness (Rahimi et al., 2020). The most critical time-

related indicators include transportation and delivery time, while production/processing time was less emphasized (Hultqvist & Olsson, 2006; Lehoux et al., 2007; Navarro et al., 2020). These indicators allow companies to identify bottlenecks and inefficiencies in order processing, production, and delivery schedules (Figueira et al., 2013a; Sarrazin et al., 2021). Improved time management practices, such as lead-time management and efficient inventory management, enhance supply chain responsiveness (Susilawati & Kanowski, 2020).

The third category, flexibility, provides resilience against demand fluctuations, environmental conditions, and logistical constraints (Björk & Carlsson, 2007). Flexibility in transportation and capacity utilization are considered important indicators (Hultqvist & Olsson, 2006; Ranta et al., 2012; Baghizadeh et al., 2021). Flexibility enables organizations to adapt their supply chain operations to external uncertainties such as seasonal variations and climate impacts (Kogler et al., 2020). For example, extreme weather conditions can delay logging and transportation activities, necessitating adaptable logistics strategies (Windisch et al., 2015; Kogler & Rauch, 2023). Flexibility-related indicators help measure a company's ability to manage such disruptions by adjusting pricing, production, and distribution processes dynamically (Weigel et al., 2009; Ceryan, Sahin, & Duenyas, 2010).

In fourth position, quality is essential for ensuring feedstock suitability and maintaining product consistency in the pulp and paper industry (O. Espinoza et al., 2010). The most significant quality-related indicator is freshness, while lumber/log grade is less frequently considered (Windisch et al., 2015; Enström et al., 2021). Quality-related indicators help evaluate the raw material's suitability for processing and production efficiency (Vafaeenezhad et al., 2019). Defect rates and log grading provide insights into material consistency, directly impacting pulp quality (Jalhar et al., 2015; Alam et al., 2014; Dai et al., 2023). Poor quality at any stage can result in waste, rework, and reputational damage (G. Figueira et al., 2013).

Additional performance indicators besides cost, time, flexibility, and quality are proposed to offer a comprehensive perspective on supply chain sustainability and operational efficiency (Mikkilä & Toppinen, 2008; Ji et al., 2012). Among these, environmental impact stands out as the most significant one, addressing concerns such as deforestation, emissions, and waste management (Boukherroub et al., 2013; Ahmadvand et al., 2021; Dai et al., 2023). Social indicators also play a crucial role, evaluating workforce conditions and ethical sourcing practices (Toppinen et al., 2017; Baghizadeh et al., 2021; Sopelana et al., 2021). While some metrics focus on adaptability to market changes and customer needs, the primary emphasis remains on sustainability and regulatory compliance, ensuring long-term operational viability (Feng et al., 2023).

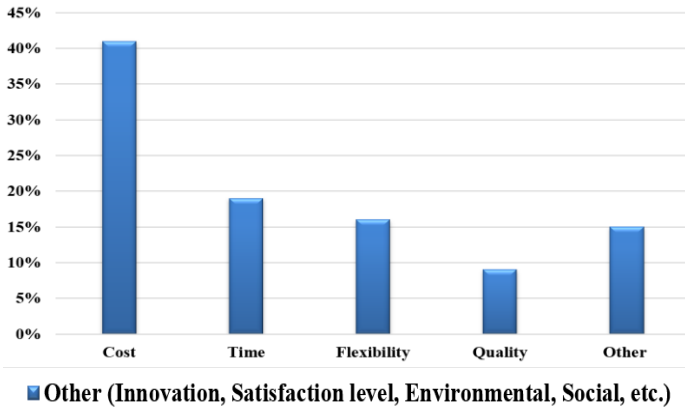


Figure 2. Frequency distribution chart for the five categories of indicators found in the reviewed articles

3.2. What are the key internal and external factors, challenges affecting the performance of the pulp and paper supply chain?

Several factors significantly influence supply chain performance, necessitating an understanding of both internal and external elements to improve operational outcomes (Björk & Carlsson, 2007; Weigel et al., 2009). Internal factors such as resource management, process efficiency, product quality, technological advancements, and safety regulations are critical determinants of supply chain success (Tereshkina, 2011; Ranta et al., 2012; Jerbi et al., 2012; Mobini et al., 2013; Boukherroub et al., 2013). Efficient allocation of resources and standardization of processes contribute to cost reductions and enhanced productivity (Alam et al., 2014; Figueira & Almada-Lobo, 2014; Svensson & Berntsson, 2014; Windisch et al., 2015; Figueira et al., 2015; Mesfun & Toffolo, 2015). In contrast, external factors including market conditions, environmental policies, partnerships, information-sharing, and government interventions influence industry competitiveness and adaptability (Bredström et al., 2004; Hultqvist & Olsson, 2006; Mikkilä & Toppinen, 2008; Shahriari et al., 2015; Toppinen et al., 2017; Akhtari et al., 2019).

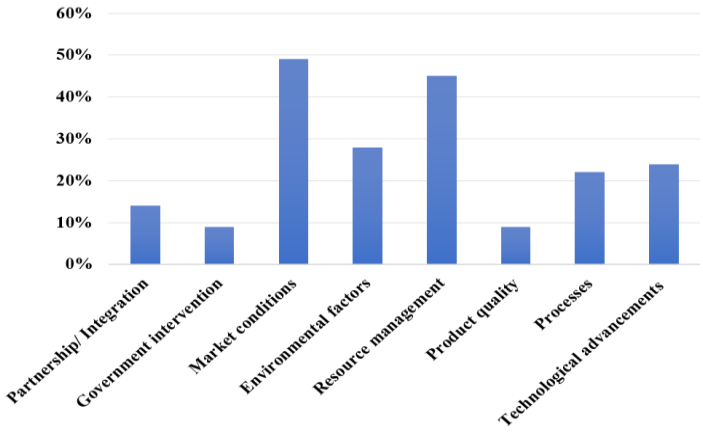


Figure 3. Frequency of factors in the examined papers

While internal and external factors define the foundational elements and conditions that shape the overall performance framework of the pulp and paper supply chain, challenges represent specific obstacles and disruptions that directly impede the efficiency and performance of the supply chain. Among the most significant challenges reported in the literature, supply chain risks and uncertainties pose considerable threats to wood supply management (Chang et al., 2015; Auer & Rauch, 2021; Kouvelis, 2023). Risks are categorized into internal and external, where internal risks arise from within the supply chain's operations, including operational inefficiencies, quality and compliance issues, delays, and transportation failures, while external risks stem from outside factors beyond the organization's control, such as market and price fluctuations, operational and disruption risks, and regulatory changes. (Ioannidou et al., 2019; Kogler & Rauch, 2020; Piqueiro et al., 2023). Competitive market shifts, regulatory changes, fluctuating demand, and economic downturns further complicate supply chain operations (Ioannidou et al., 2019; Pätäri, 2010; Torjai et al., 2015). Uncertainty exacerbates decision-making due to unpredictable

supply, demand fluctuations, raw material quality variability, seasonal yield fluctuations, and climate-related disruptions (Fazli-Khalaf et al., 2017; Nayeri et al., 2021a; Bairamzadeh et al., 2018; Pishvaee et al., 2011). Changing consumer preferences contribute to heightened uncertainties, necessitating adaptive management strategies to navigate fluctuations in global demand, regulatory shifts, and evolving sustainability standards. These dynamic factors require continuous strategic adjustments to ensure supply chain stability (Gibson & Warren, 2016; Fan et al., 2019; Ahmadvand & Sowlati, 2022; Piedra-Jimenez et al., 2024; Berg & Athanassiadis, 2020; Alvarez et al., 2020; Navarro et al., 2020; Nuengwang et al., 2020; Rahimi et al., 2020; Ferreira et al., 2020). Figures 3 and 4 present the frequency of factors and challenges identified in the analyzed studies respectively.

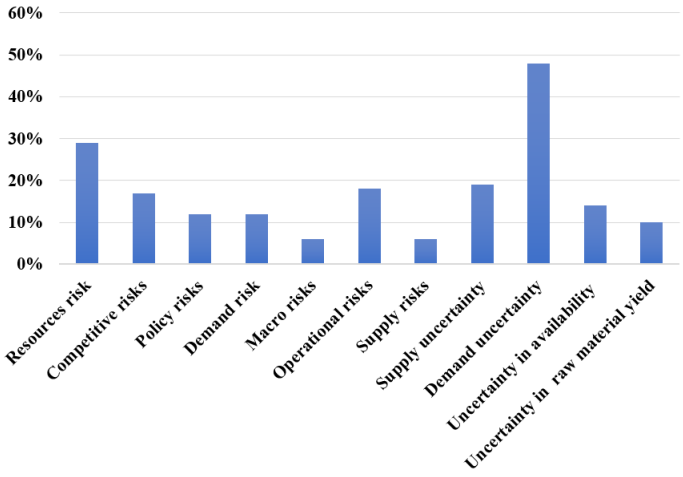


Figure 4. Frequency of challenges in the examined papers

3.3. What are the key strategies and their advantages for improving the pulp and paper supply chain?

Strategies that enhance resilience, responsiveness, coordination, and efficiency appear as efficient approaches to address the previously identified challenges. Resilience ensures continuity by mitigating disruptions through multiple transportation modes, additional inventory buffers, backup suppliers, and extra capacity to handle demand variations (Namdar et al., 2021; Nayeri et al., 2022; Piqueiro et al., 2023; Gital & Bilgen, 2024; Gomes, 2024). These measures contribute to reducing risks associated with supply chain disruptions and maintaining operational stability. Agility is another strategy that enables rapid responses to market changes and enhances decision-making processes (Alamroshan et al., 2022; Asadi et al., 2022; Salleh et al., 2020). By focusing on reducing time-related parameters and ensuring high service levels, organizations can improve lead times and customer satisfaction (Hultqvist & Olsson, 2006; Lehoux et al., 2007; Marques et al., 2014; Windisch et al., 2015; Navarro et al., 2020; Hoogstra-Klein & Meijboom, 2021; Sarrazin et al., 2021; Piqueiro et al., 2023; Ghasemi et al., 2024). Coordination plays a crucial role in integrating supply chain processes effectively. Joint decision-making, enhanced information sharing, and well-defined contractual agreements contribute to synchronized operations, minimizing inefficiencies and fostering collaboration among stakeholders (Ghasemi et al., 2023; Alayet et al., 2018; Rahimi et al., 2020, 2022; Cloutier et al., 2020; Moyaux et al., 2007; Simard et al., 2023; Shahriari et al., 2015; Dumetz et al., 2021). Optimizing inventory and production strategies further enhances supply chain performance. Inventory management approaches such as Vendor Managed Inventory (VMI), Fixed Order Quantity, Collaborative Planning, Forecasting, and Replenishment (CPFR), and Variable Inventory Control (VIC) ensure balanced stock levels, reducing shortages and excess inventory (Hultqvist & Olsson, 2006; Björk & Carlsson, 2007; Waldemarsson et al., 2013; Alam et al., 2014; Vafaeenezhad & Tavakkoli-Moghaddam, 2016; Akhtari et al., 2019; Alvarez et al., 2020; Ahmadvand et al., 2021; Rahimi et al., 2022; Piqueiro et al., 2023; Ghasemi et al., 2024). In the pulp and paper supply chain, the choice of production strategies Make-to-Stock (MTS), Make-to-Order (MTO), and Production Lot Sizing (PLS)—depends on industry-specific factors such as raw material variability, high capital intensity, and fluctuating demand. MTS is commonly used for standardized, high-demand products like printing paper and packaging where demand is predictable, but it faces challenges for items with high storage costs such as bulky paper products. MTO, on the other hand, is suitable for customized or specialty items such as high-grade printing paper or coated finishes, but it struggles with long production cycles and high setup costs for small orders, requiring customer tolerance for longer lead times. PLS is highly relevant for batch processes like pulping and papermaking, optimizing large production runs to minimize setup costs and energy consumption, though it risks excess inventory if demand fluctuates unexpectedly. Key factors influencing strategy choice include demand predictability, customer lead time tolerance, setup costs, and storage capacity. These strategies help manufacturers optimize inventory levels, minimize waste, and respond effectively to demand fluctuations. (Bredström et al., 2004; Weigel et al., 2009; Lehoux et al., 2011; Figueira & Almada-Lobo, 2014; Machani et al., 2015; Shahi et al., 2017; Vitale et al., 2022; Piedra-Jimenez et al., 2024).

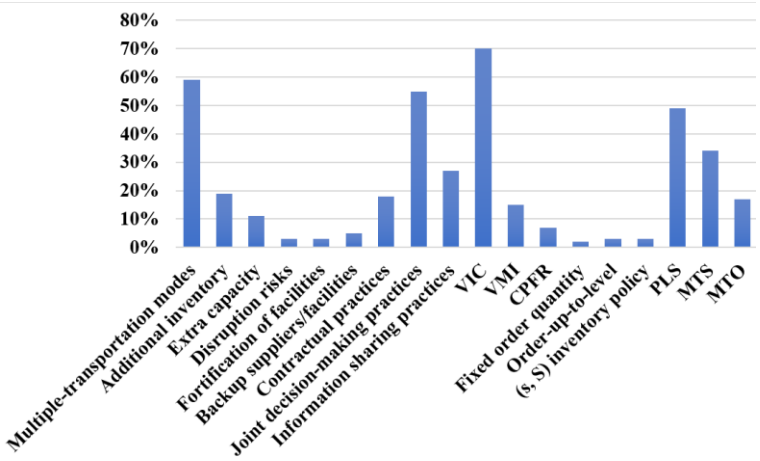


Figure 5. Distribution of strategies in the examined papers

The pulp and paper sector faces limited fiber accessibility, transportation constraints, supply uncertainties, and the need for consistent in-feed deliveries of various wood species. These complexities require effective cost control, optimized logistics, and uninterrupted mill operations to maintain productivity. Researchers have therefore used advanced quantitative modeling techniques to analyze and optimize these realities, such as optimization methods for decision-making, simulation modeling to test real-world scenarios, analytical

modeling for deriving optimal solutions, and hybrid simulation-optimization approaches to include uncertainty in real-world scenarios (Almeder et al., 2009; Bredström et al., 2004; Hultqvist a& Olsson, 2006; Boukherroub et al., 2013; Ouhimmou et al., 2019; Ferreira et al., 2020; Ahmadvand & Sowlati, 2022; Rahimi et al., 2022; Piqueiro et al., 2023). Optimization techniques are widely applied, and their value lies in addressing specific challenges in the pulp and paper supply chain. For example, these tools have been used to optimize logistics planning, such as wood procurement and transportation, which are critical given the sector's challenges with fiber accessibility, transport constraints, and supply uncertainty (Bredström et al., 2004; Figueira et al., 2015). Similarly, optimization has been applied to improve production scheduling and batch sizing, ensuring efficient use of diverse wood species (Mesfun & Toffolo, 2015; Gautam et al., 2017). Analytical models, incorporating methodologies like Data Envelopment Analysis (DEA) and Analytic Hierarchy Process (AHP), provide deeper insights into decision-making. For instance, DEA has been used to evaluate the efficiency of wood procurement strategies (Mikkilä & Toppinen, 2008), while AHP has been applied to prioritize suppliers based on reliability and cost, addressing the challenge of supply uncertainty (Shahriari et al., 2015). These methods synthesize complex data to support strategic decisions, such as optimizing raw material mixes or selecting transportation routes. Simulation methods are particularly valuable for analyzing dynamic scenarios and assessing risks. Studies have evaluated the impact of disruptions in wood supply and transportation, helping mills to design resilient procurement strategies (Mobini et al., 2013; Windisch et al., 2015). Simulation has also been applied to improve inventory levels and production flows, addressing the challenge of maintaining continuous in-feed deliveries of diverse wood species (Akhtari et al., 2019; Kogler et al., 2020). Hybrid approaches combine the strengths of optimization and simulation. These methods have been used to optimize batch production while accounting for demand variability and to improve energy efficiency in pulp production (Figueira & Almada-Lobo, 2014; Ahmadvand & Sowlati, 2022). By linking these tools and techniques, generic statements are transformed into actionable insights, demonstrating how these methods address real-world problems and support strategic decision-making. Figures 5 and 6 depict the distribution of strategies and techniques found in the literature.

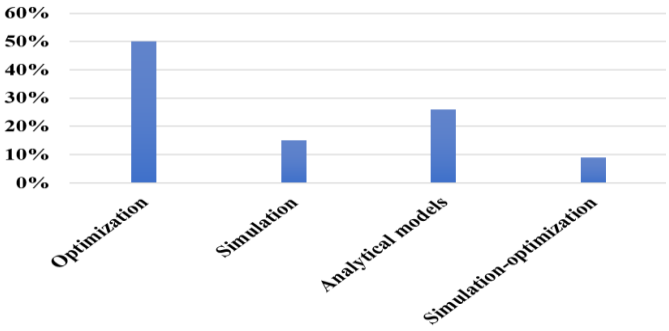


Figure 6. Distribution of techniques in the examined papers

4 DISCUSSION

The literature review provided valuable insights into wood supply management for feedstock delivery to pulp and paper mills. It led to a comprehensive understanding of the performance measurement of the pulp and paper supply chain, focusing on performance indicators such as timeliness of feedstock delivery, quality, flexibility, and cost per unit; internal factors like production capacity, quality assurance, and process efficiency; as well as external influences such as economic conditions, regulatory requirements, and environmental sustainability (Fernandez-Lacruz et al., 2021; Hoefnagels et al., 2014). Understanding these elements and their interconnections helps companies fine-tune their strategies and enhance the overall supply chain performance. By enabling quick adjustments to market shifts, aligning feedstock supply with mill operations, improving coordination across stakeholders, identifying optimal strategies, and driving continuous improvements, businesses can reduce disruptions, optimize efficiency, and maintain operational flexibility. This proactive approach not only enhances cost-effectiveness and lead-time reduction, but also strengthens supplier relationships, improves demand forecasting, and mitigates risks associated with supply chain uncertainties (Eliasson et al., 2018).

Based on the literature review, a conceptual framework was built to provide guidance on an efficient wood supply management for pulp and paper mills (Figure 7). It begins by identifying critical KPIs such as logistics and operational expenses, delivery time efficiency, and production/processing time, which are directly influenced by internal factors like storage capacity, supplier reliability, and logistics capacity (Palander & Voutilainen, 2013). For instance, maintaining optimal inventory levels acts as a buffer against disruptions caused by external factors such as seasonal yield fluctuations, price volatility, or transportation delays (Väätäinen et al., 2021; Rahman et al., 2022). External factors like market demand variability, raw material quality fluctuations, and geopolitical instability are considered, with risk categorization helping to identify uncertainties such as demand-supply mismatches or raw material costs, yield variations, harvest timing, operational expenses, and material quality inconsistencies (Figueira et al., 2013b). These risks are mitigated through targeted strategies like demand forecasting, supplier diversification, and predictive maintenance, which enhance supply chain reliability and reduce dependency on single sources (D'Amours et al., 2008; Carlsson et al., 2009; Figueira et al., 2014). To strengthen resilience and agility, the framework incorporates strategies such as maintaining inventory buffers, establishing redundant transportation networks, and identifying alternative logging sites (Rauch, 2017). Predictive analytics and simulation models enable dynamic adjustments to operations in response to market fluctuations or disruptions, ensuring continuous production and operational balance (Eliasson et al., 2018; Palander & Voutilainen, 2013; Ghasemi et al., 2024). Production strategies, such as aligning production rates with digester consumption and implementing make-to-stock and make-to-order processes, are synchronized with upstream and downstream activities using forecasting models (Hoefnagels et al., 2014). Integrating scheduling of forest harvesting with mill production needs further optimized operations, ensuring precise feedstock deliveries (Fernandez-Lacruz et al., 2021; Fang et al., 2022). Stakeholder coordination is pivotal, fostering seamless collaboration across procurement, production, distribution, and sustainability initiatives (D'Amours et al., 2008). For example, flexible contracts allow adjustments to supply volumes and fiber types based on mill requirements, while real-time data exchange ensures transparency in raw material availability, transport status, and mill inventory (Rahman et al., 2022; Virkkunen et al., 2015; Lehoux et al., 2010; Auer & Rauch, 2021). Joint decision-making and shared insights on fiber quality ensure effective

supply alignment, optimizing coordination between supply chain activities and mill operations. (Figueira et al., 2013). By considering all these key elements together, it becomes possible to tend towards a precise wood supply for pulp and paper mills while ensuring a more efficient and adaptive supply chain (Mikkilä & Toppinen, 2008; Lotfi et al., 2024).

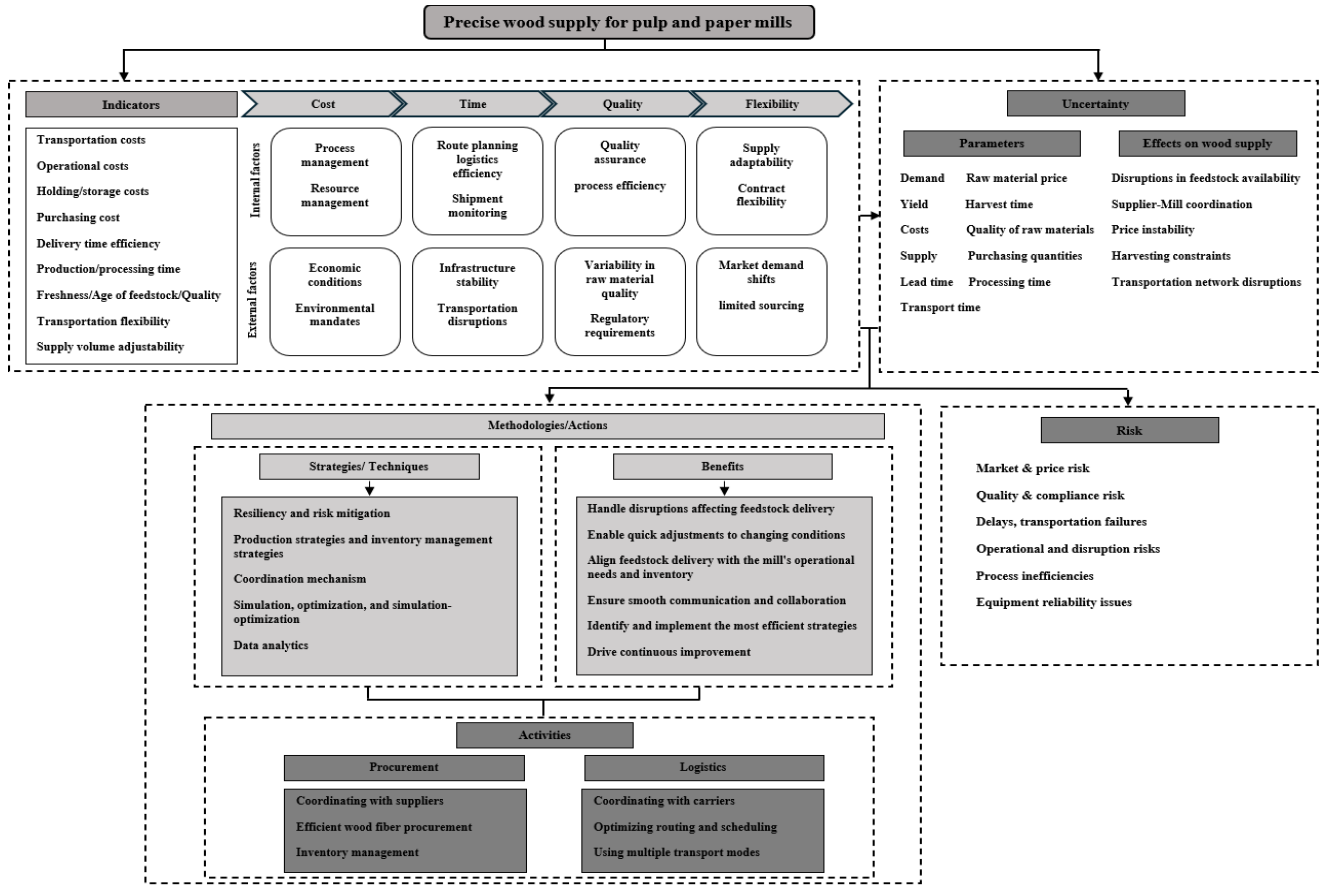


Figure 5. A conceptual framework for precise wood supply to pulp and paper mills.

5 CONCLUSION

The pulp and paper industry faces intense global competition, making effective supply chain management vital. However, choosing the right performance metrics is challenging due to the wide range of options. This study reviewed 124 articles to identify key elements of supply chain performance measurement. The findings revealed that most of the available research focused on functional indicators such as cost-related and time-related indicators. Internal factors such as resource management and external factors like market conditions were highlighted as critical influences on supply chain performance. Additionally, two main challenges that affect the performance were frequently cited: risks and uncertainty. Based on the results, the most frequently cited risks in the pulp and paper supply chain were resource and operational risks. Among uncertainty-related challenges, demand uncertainty was the most mentioned. Additionally, supply chain resilience and agility appeared to be vital for addressing industry-specific challenges, such as competitive fiber purchasing and seasonal raw material fluctuations. Performance measures that assess adaptability to market changes, inventory and production management efficiency, and supplier collaboration are crucial in overcoming these challenges. The review results showed that several techniques and decision-making tools were proposed by authors. The modeling approaches were grouped into four categories: (i) Optimization, (ii) Simulation, (ii) Analytical models, and (iv) Simulation-optimization. A framework was developed to enhance the performance of the pulp and paper supply chain by ensuring precise wood supply delivery. It summarized key elements (KPIs, factors, challenges) influencing performance while illustrating their interconnections.

This study followed a recognized method but has limitations. Results depend on selected keywords, databases, and definitions of key concepts, which could influence findings. The focus on journal articles from 2000–2023 may exclude other relevant literature, and reliance on keyword searches and initial categorization introduces potential bias. A broader scope could improve comprehensiveness. Based on this work, future research could prioritize real case studies, identifying success factors and implementing strategies based on relevant indicators to assess the potential benefits in the pulp and paper industry.

6 ACKNOWLEDGEMENT

The authors gratefully acknowledge the financial support provided by FORAC Research Consortium of Université Laval for its financial support.

REFERENCES

Ab Talib, M. S., Abdul Hamid, A. B., & Thoo, A. C. (2015). Critical success factors of supply chain management: a literature survey and Pareto analysis. EuroMed Journal of Business, 10(2), 234-263.

Abasian, F., Rönnqvist, M., & Ouhimmou, M. (2017). Forest fibre network design with multiple assortments: a case study in Newfoundland. Canadian Journal of Forest Research, 47(9), 1232-1243.

Abusaq, Z., Habib, M. S., Shehzad, A., Kanan, M., & Assaf, R. (2022). A flexible robust possibilistic programming approach toward wood pellets supply chain network design. Mathematics, 10(19), 3657.

Ahmadvand, S., & Sowlati, T. (2022). A robust optimization model for tactical planning of the forest-based biomass supply chain for syngas production. Computers & Chemical Engineering, 159, 107693.

Ahmadvand, S., Khadivi, M., Arora, R., & Sowlati, T. (2021). Bi-objective optimization of forest-based biomass supply chains for minimization of costs and deviations from safety stock. Energy Conversion and Management: X, 11, 100101.

Akhtari, S., Sowlati, T., Siller-Benitez, D. G., & Roeser, D. (2019). Impact of inventory management on demand fulfilment, cost and emission of forest-based biomass supply chains using simulation modelling. Biosystems engineering, 178, 184-199.

Alam, M. B., Shahi, C., & Pulkki, R. (2014). Economic impact of enhanced forest inventory information and merchandizing yards in the forest product industry supply chain. Socio-Economic Planning Sciences, 48(3), 189-197.

Alamroshan, F., La'li, M., & Yahyaei, M. (2022). The green-agile supplier selection problem for the medical devices: a hybrid fuzzy decision-making approach. Environmental Science and Pollution Research, 29(5), 6793-6811.

Alayet, C., Lehoux, N., & Lebel, L. (2018). Logistics approaches assessment to better coordinate a forest products supply chain. Journal of Forest Economics, 30, 13-24.

Alikhani, R., Ranjbar, A., Jamali, A., Torabi, S. A., & Zobel, C. W. (2023). Towards increasing synergistic effects of resilience strategies in supply chain network design. Omega, 116, 102819.

Almeder, C., Preusser, M., & Hartl, R. F. (2009). Simulation and optimization of supply chains: alternative or complementary approaches. OR spectrum, 31, 95-119.

Alvarez, P. P., Espinoza, A., Maturana, S., & Vera, J. (2020). Improving consistency in hierarchical tactical and operational planning using Robust Optimization. Computers & Industrial Engineering, 139, 106112.

Asadi, Z., Khatir, M. V., & Rahimi, M. (2022). Robust design of a green-responsive closed-loop supply chain network for the ventilator device. Environmental Science and Pollution Research, 29(35), 53598-53618.

Auer, V., & Rauch, P. (2021). Wood supply chain risks and risk mitigation strategies: A systematic review focusing on the Northern hemisphere. Biomass and Bioenergy, 148, 106001.

Baghizadeh, K., Zimon, D., & Jum'a, L. (2021). Modeling and optimization sustainable forest supply chain considering discount in transportation system and supplier selection under uncertainty. Forests, 12(8), 964.

Bairamzadeh, S., Saidi-Mehrabad, M., & Pishvaee, M. S. (2018). Modelling different types of uncertainty in biofuel supply network design and planning: A robust optimization approach. Renewable energy, 116, 500-517.

Berg, S., & Athanassiadis, D. (2020). The cost of closed terminals in the supply chain for a potential biorefinery in northern Sweden. Scandinavian Journal of Forest Research, 35(3-4), 165-176.

Björk, K. M., & Carlsson, C. (2007). The effect of flexible lead times on a paper producer. International Journal of Production Economics, 107(1), 139-150.

Boukherroub, T., LeBel, L., & Lemieux, S. (2017). An integrated wood pellet supply chain development: Selecting among feedstock sources and a range of operating scales. Applied energy, 198, 385-400.

Boukherroub, T., Ruiz, A., Guinet, A., & Fondrevelle, J. (2013). An integrated approach for the optimization of the sustainable performance: A wood supply chain. IFAC Proceedings Volumes, 46(9), 186-191.

Bredström, D., Lundgren, J. T., Rönnqvist, M., Carlsson, D., & Mason, A. (2004). Supply chain optimization in the pulp mill industry—IP models, column generation and novel constraint branches. European journal of operational research, 156(1), 2-22.

Carlsson, D. (2006). Supply chain management in the pulp and paper industry. CIRRELT.

Carlsson, D., D'Amours, S., Martel, A., & Rönnqvist, M. (2009). Supply chain planning models in the pulp and paper industry. INFOR: Information Systems and Operational Research, 47(3), 167-183.

Chang, W., Ellinger, A. E., & Blackhurst, J. (2015). A contextual approach to supply chain risk mitigation. The International Journal of Logistics Management, 26(3), 642-656.

Christopher, M., & Peck, H. (2004). Building the resilient supply chain.

Cloutier, C., Oktaei, P., & Lehoux, N. (2020). Collaborative mechanisms for sustainability-oriented supply chain initiatives: State of the art, role assessment and research opportunities. International Journal of Production Research, 58(19), 5836-5850.

Dai, M., Sun, M., Chen, B., Xie, H., Zhang, D., Han, Z., ... & Wang, Y. (2023). Advancing sustainability in China's pulp and paper industry requires coordinated raw material supply and waste paper management. Resources, Conservation and Recycling, 198, 107162.

de Almeida Sfeir, T., Junior, J. E. P., Ruiz, A., & LeBel, L. (2021). Integrating natural wood drying and seasonal trucks' workload restrictions into forestry transportation planning. Omega, 98, 102135.

Dobos, I. (2003). Optimal production–inventory strategies for a HMMS-type reverse logistics system. International Journal of Production Economics, 81, 351-360.

Dumetz, L., Gaudreault, J., Bril El-Haouzi, H., Thomas, A., Lehoux, N., & Marier, P. (2021). Tactical-operational coordination of a divergent production system with coproduction: the sawmilling challenge. INFOR: Information Systems and Operational Research, 59(3), 377-399.

Durach, C. F., Kembro, J., & Wieland, A. (2017). A new paradigm for systematic literature reviews in supply chain management. Journal of Supply Chain Management, 53(4), 67-85.

Enström, J., Eriksson, A., Eliasson, L., Larsson, A., & Olsson, L. (2021). Wood chip supply from forest to port of loading–A simulation study. Biomass and Bioenergy, 152, 106182.

Erwin, E. (2021). The Impact of Agile Suppy Chain Strategy on Sustainability Performance with Company's Sustainability Reporting: Evidence from Pulp & Paper Industry in Indonesia. JIA (Jurnal Ilmiah Akuntansi), 6(2), 353-378.

Espinoza, O. A., Bond, B. H., & Kline, E. (2010). Quality measurement in the wood products supply chain. Forest Products Journal, 60(3), 249-257.

Espinoza, O., Bond, B. H., & Kline, E. (2010). Supply chain measures of performance for wood products manufacturing. Forest Products Journal, 60(7-8), 700-708.

Fan, K., Li, X., Wang, L., & Wang, M. (2019). Two-stage supply chain contract coordination of solid biomass fuel involving multiple suppliers. Computers & Industrial Engineering, 135, 1167-1174.

Fang, H., Fang, F., Hu, Q., & Wan, Y. (2022). Supply chain management: a review and bibliometric analysis. Processes, 10(9), 1681.

Fazli-Khalaf, M., Mirzazadeh, A., & Pishvaee, M. S. (2017). A robust fuzzy stochastic programming model for the design of a reliable green closed-loop supply chain network. Human and ecological risk assessment: an international journal, 23(8), 2119-2149.

Feng, B., Hu, X., & Orji, I. J. (2023). Multi-tier supply chain sustainability in the pulp and paper industry: a framework and evaluation methodology. International Journal of Production Research, 61(14), 4657-4683.

Ferreira, M. A., Gomide, L. R., Contreras, M. A., Lopes, E. T., Rodrigues, R. C., Mello, J. M. D., & Mendonça, N. D. P. (2020). Wood supply optimization in Brazilian pulp industry involving forestry outgrower scheme. Revista Árvore, 43, e430504.

Fiaschi, D., & Michelini, M. (2001). A two-phase one-dimensional biomass gasification kinetics model. Biomass and Bioenergy, 21(2), 121-132.

Figueira, G., & Almada-Lobo, B. (2014). Robust Production Planning and Scheduling of a Pulp Digester and a Paper Machine. In Computer Aided Chemical Engineering (Vol. 33, pp. 499-504). Elsevier.

Figueira, G., Amorim, P., Guimarães, L., Amorim-Lopes, M., Neves-Moreira, F., & Almada-Lobo, B. (2015). A decision support system for the operational production planning and scheduling of an integrated pulp and paper mill. Computers & Chemical Engineering, 77, 85-104.

Figueira, G., Furlan, M., & Almada-Lobo, B. (2013). Predictive production planning in an integrated pulp and paper mill. IFAC Proceedings Volumes, 46(9), 371-376.

Gautam, S., LeBel, L., & Carle, M. A. (2017). Supply chain model to assess the feasibility of incorporating a terminal between forests and biorefineries. Applied energy, 198, 377-384.

Ghasemi, E., Lehoux, N., & Rönnqvist, M. (2023). Coordination, cooperation, and collaboration in production-inventory systems: a systematic literature review. International journal of production research, 61(15), 5322-5353.

Ghasemi, E., Lehoux, N., & Rönnqvist, M. (2024). A multi-level production-inventory-distribution system under mixed make to stock, make to order, and vendor managed inventory strategies: An application in the pulp and paper industry. International Journal of Production Economics, 271, 109201.

Ghasemi, E., Lehoux, N., & Rönnqvist, M. (2024). Model and solution approach to coordinate production-inventory strategies considering nonlinear price-sensitive demand: application to Canadian pulp and paper industry. International Journal of Production Research, 62(19), 6903-6932.

Gibson, C., & Warren, A. (2016). Resource-sensitive global production networks: Reconfigured geographies of timber and acoustic guitar manufacturing. Economic Geography, 92(4), 430-454.

Gital, Y., & Bilgen, B. (2024). Resilient strategies for managing supply and facility disruptions in a biomass supply chain. Applied Energy, 372, 123808.

Gomes, R. L. P. S. (2024). The role of flexibility in forest-to-bioenergy supply chain risk management (Doctoral dissertation, Universidade do Porto (Portugal)).

Hoogstra-Klein, M. A., & Meijboom, K. (2021). A qualitative exploration of the wood product supply chain–investigating the possibilities and desirability of an increased demand orientation. Forest Policy and Economics, 133, 102606.

Hughes, N. M., Shahi, C., & Pulkki, R. (2014). A review of the wood pellet value chain, modern value/supply chain management approaches, and value/supply chain models. Journal of Renewable Energy, 2014(1), 654158.

Hultqvist, D., & Olsson, L. (2006). Optimization of raw material procurement at pulp or paper mills–the influence of weather-related risks. International journal of systems science, 37(4), 253-269.

Ioannidou, D., Pommier, R., Habert, G., & Sonnemann, G. (2019). Evaluating the risks in the construction wood product system through a criticality assessment framework. Resources, Conservation and Recycling, 146, 68-76.

Ivanov, D. (2022). Viable supply chain model: integrating agility, resilience and sustainability perspectives—lessons from and thinking beyond the COVID-19 pandemic. Annals of operations research, 319(1), 1411-1431.

Ivanov, D., & Keskin, B. B. (2023). Post-pandemic adaptation and development of supply chain viability theory. Omega, 116, 102806.

Ivanov, D., Dolgui, A., Blackhurst, J. V., & Choi, T. M. (2023). Toward supply chain viability theory: from lessons learned through COVID-19 pandemic to viable ecosystems. International Journal of Production Research, 61(8), 2402-2415.

Jafari, T., Zarei, A., Azar, A., & Moghaddam, A. (2023). The impact of business intelligence on supply chain performance with emphasis on integration and agility–a mixed research approach. International Journal of Productivity and Performance Management, 72(5), 1445-1478.

Jalhar, S. K., Pant, M. I. L. L. I. E., & Nagar, M. C. (2015). Differential evolution for sustainable supplier selection in pulp and paper industry: a DEA based approach. Comput. Methods Mater. Sci, 15, 118-126.

Jauhar, S. K., Raj, P. V. R. P., Kamble, S., Pratap, S., Gupta, S., & Belhadi, A. (2024). A deep learning-based approach for performance assessment and prediction: A case study of pulp and paper industries. Annals of Operations Research, 1-27.

Jerbi, W., Gaudreault, J., D'Amours, S., Nourelfath, M., Lemieux, S., Marier, P., & Bouchard, M. (2012, October). Optimization/simulation-based framework for the evaluation of supply chain management policies in the forest product industry. In 2012 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC) (pp. 1742-1748). IEEE.

Ji, X., Lundgren, J., Wang, C., Dahl, J., & Grip, C. E. (2012). Simulation and energy optimization of a pulp and paper mill–Evaporation plant and digester. Applied energy, 97, 30-37.

Jolley, G. J., Khalaf, C., Michaud, G. L., & Belleville, D. (2020). The economic contribution of logging, forestry, pulp & paper mills, and paper products: A 50-state analysis. Forest Policy and Economics, 115, 102140.

Junginger, M., Van Dam, J., Zarrilli, S., Mohamed, F. A., Marchal, D., & Faaij, A. (2011). Opportunities and barriers for international bioenergy trade. Energy Policy, 39(4), 2028-2042.

Kline, K. L., Dale, V. H., & Rose, E. (2021). Resilience lessons from the Southeast United States woody pellet supply chain response to the COVID-19 pandemic. Frontiers in Forests and Global Change, 4, 674138.

Ko, S., Lautala, P., & Handler, R. M. (2018). Securing the feedstock procurement for bioenergy products: a literature review on the biomass transportation and logistics. Journal of Cleaner Production, 200, 205-218.

Kogler, C., & Rauch, P. (2019). A discrete-event simulation model to test multimodal strategies for a greener and more resilient wood supply. Canadian Journal of Forest Research, 49(10), 1298-1310.

Kogler, C., & Rauch, P. (2020). Contingency plans for the wood supply chain based on bottleneck and queuing time analyses of a discrete event simulation. Forests, 11(4), 396.

Kogler, C., & Rauch, P. (2023). Lead time and quality driven transport strategies for the wood supply chain. Research in Transportation Business & Management, 47, 100946.

Kogler, C., Schimpfhuber, S., Eichberger, C., & Rauch, P. (2021). Benchmarking procurement cost saving strategies for wood supply chains. Forests, 12(8), 1086.

Kogler, C., Stenitzer, A., & Rauch, P. (2020). Simulating combined self-loading truck and semitrailer truck transport in the wood supply chain. Forests, 11(12), 1245.

Kons, K., La Hera, P., & Bergström, D. (2020). Modelling dynamics of a log-yard through discrete-event mathematics. Forests, 11(2), 155.

Kouvelis, P. (2023). Supply Chain-Centric View of Working Capital, Hedging, and Risk Management: Integrated Supply Chain Finance. In Tutorials in Operations Research: Advancing the Frontiers of OR/MS: From Methodologies to Applications (pp. 246-284). INFORMS.

Laflamme-Mayer, M., Janssen, M., & Stuart, P. (2011). Development of an operations-driven cost model for continuous processes Part 1: Framework for design and operations decision making. J-FOR-JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY FOR FOREST PRODUCTS AND PROCESSES, 1(1), 32-41..

Lehoux, N., D'Amours, S., & Langevin, A. (2007). Collaboration and decision models for a two-echelon supply chain: a case study in the pulp and paper industry. CIRRELT.

Lehoux, N., D'Amours, S., & Langevin, A. (2010). A win-win collaboration approach for a two-echelon supply chain: a case study in the pulp and paper industry. European Journal of Industrial Engineering, 4(4), 493-514..

Lehoux, N., d'Amours, S., Frein, Y., Langevin, A., & Penz, B. (2011). Collaboration for a two-echelon supply chain in the pulp and paper industry: the use of incentives to increase profit. Journal of the Operational Research Society, 62(4), 581-592.

Lotfi, R., Hazrati, R., Aghakhani, S., Afshar, M., Amra, M., & Ali, S. S. (2024). A data-driven robust optimization in viable supply chain network design by considering Open Innovation and Blockchain Technology. Journal of Cleaner Production, 436, 140369.

Macchion, L., & Fornasiero, R. (2021). Global–local supply chain configurations for different production strategies: a comparison between traditional and customized productions. Journal of Fashion Marketing and Management: An International Journal, 25(2), 290-309.

Machani, M., Nourelfath, M., & D'Amours, S. (2015). A scenario-based modelling approach to identify robust transformation strategies for pulp and paper companies. International Journal of Production Economics, 168, 41-63.

Marques, A. F., de Sousa, J. P., & Rönnqvist, M. (2014). Combining optimization and simulation tools for short-term planning of forest operations. Scandinavian Journal of Forest Research, 29(sup1), 166-177.

Mentzer, J. T., DeWitt, W., Keebler, J. S., Min, S., Nix, N. W., Smith, C. D., & Zacharia, Z. G. (2001). Defining supply chain management. Journal of Business logistics, 22(2), 1-25.

Mesfun, S., & Toffolo, A. (2015). Integrating the processes of a Kraft pulp and paper mill and its supply chain. Energy Conversion and Management, 103, 300-310.

Metwally, A. B., Ali, S. A., & Mohamed, A. T. (2020, October). Resilience and agility as indispensable conditions for sustaining viable supply chain during pandemics: the case of Bahrain. In 2020 International Conference on Data Analytics for Business and Industry: Way Towards a Sustainable Economy (ICDABI) (pp. 1-5). IEEE.

Mikkilä, M., & Toppinen, A. (2008). Corporate responsibility reporting by large pulp and paper companies. Forest policy and economics, 10(7-8), 500-506.

Mobini, M., Sowlati, T., & Sokhansanj, S. (2013). A simulation model for the design and analysis of wood pellet supply chains. Applied energy, 111, 1239-1249.

Moher, D., Shamseer, L., Clarke, M., Ghersi, D., Liberati, A., Petticrew, M., ... & Prisma-P Group. (2015). Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. Systematic reviews, 4, 1-9.

Motevalli-Taher, F., Paydar, M. M., & Emami, S. (2020). Wheat sustainable supply chain network design with forecasted demand by simulation. Computers and Electronics in Agriculture, 178, 105763.

Moyaux, T., Chaib-draa, B., & D'Amours, S. (2007). Information sharing as a coordination mechanism for reducing the bullwhip effect in a supply chain. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 37(3), 396-409.

Namdar, J., Torabi, S. A., Sahebjamnia, N., & Nilkanth Pradhan, N. (2021). Business continuity-inspired resilient supply chain network design. International Journal of Production Research, 59(5), 1331-1367.

Navarro, N., Fallas Valverde, P. D., Quesada, H. J., & Madrigal-Sánchez, J. (2020). A Supplier Selection Model for the Wood Fiber Supply Industry. BioResources, 15(1).

Nayeri, S., Paydar, M. M., Asadi-Gangraj, E., & Emami, S. (2020). Multi-objective fuzzy robust optimization approach to sustainable closed-loop supply chain network design. Computers & Industrial Engineering, 148, 106716.

Nayeri, S., Sazvar, Z., & Heydari, J. (2022). A global-responsive supply chain considering sustainability and resiliency: Application in the medical devices industry. Socio-Economic Planning Sciences, 82, 101303.

Nayeri, S., Tavakoli, M., Tanhaeean, M., & Jolai, F. (2022). A robust fuzzy stochastic model for the responsive-resilient inventory-location problem: comparison of metaheuristic algorithms. Annals of Operations Research, 1-41.

Nayeri, S., Torabi, S. A., Tavakoli, M., & Sazvar, Z. (2021). A multi-objective fuzzy robust stochastic model for designing a sustainable-resilient-responsive supply chain network. Journal of Cleaner Production, 311, 127691.

Nuengwang, W., Srinophakun, T. R., & Realff, M. J. (2020). Real-time optimization of pulp mill operations with wood moisture content variation. Processes, 8(6), 651.

Nur, F., Aboytes-Ojeda, M., Castillo-Villar, K. K., & Marufuzzaman, M. (2021). A two-stage stochastic programming model for biofuel supply chain network design with biomass quality implications. IISE transactions, 53(8), 845-868.

Ouhimmou, M., Nourelfath, M., Bouchard, M., & Bricha, N. (2019). Design of robust distribution network under demand uncertainty: A case study in the pulp and paper. International Journal of Production Economics, 218, 96-105.

Pätäri, S. (2010). Industry-and company-level factors influencing the development of the forest energy business—insights from a Delphi Study. Technological Forecasting and Social Change, 77(1), 94-109.

Philpott, A., & Everett, G. (2001). Supply chain optimisation in the paper industry. Annals of operations research, 108, 225-237.

Piedra-Jimenez, F., Torres, A. I., & Rodriguez, M. A. (2024). A robust disjunctive formulation for the redesign of forest biomass-based fuels supply chain under multiple factors of uncertainty. Computers & Chemical Engineering, 181, 108540.

Piqueiro, H., Gomes, R., Santos, R., & de Sousa, J. P. (2023). Managing Disruptions in a Biomass Supply Chain: A Decision Support System Based on Simulation/Optimisation. Sustainability 2023, 15, 7650.

Pishvaee, M. S., Rabbani, M., & Torabi, S. A. (2011). A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty. Applied mathematical modelling, 35(2), 637-649.

Poles, R. (2013). System Dynamics modelling of a production and inventory system for remanufacturing to evaluate system improvement strategies. International Journal of Production Economics, 144(1), 189-199.

Power, D. (2005). Supply chain management integration and implementation: a literature review. Supply chain management: an International journal, 10(4), 252-263.

Psathas, F., Georgiou, P. N., & Rentizelas, A. (2022). Optimizing the design of a biomass-to-biofuel supply chain network using a decentralized processing approach. Energies, 15(14), 5001.

Qi, Y., Huo, B., Wang, Z., & Yeung, H. Y. J. (2017). The impact of operations and supply chain strategies on integration and performance. International Journal of Production Economics, 185, 162-174.

Qi, Y., Huo, B., Wang, Z., & Yeung, H. Y. J. (2017). The impact of operations and supply chain strategies on integration and performance. International Journal of Production Economics, 185, 162-174.

Rabbani, M., Sabbaghnia, A., Mobini, M., & Razmi, J. (2020). A graph theory-based algorithm for a multi-echelon multi-period responsive supply chain network design with lateral-transshipments. Operational Research, 20, 2497-2517.

Rahimi, A., Rönnqvist, M., LeBel, L., & Audy, J. F. (2020). An optimization model for selecting wood supply contracts. Canadian Journal of Forest Research, 50(4), 399-412.

Rahimi, A., Rönnqvist, M., LeBel, L., & Audy, J. F. (2021). Selecting wood supply contracts under uncertainty using stochastic programming. INFOR: Information Systems and Operational Research, 59(2), 191-211.

Rahimi, A., Rönnqvist, M., LeBel, L., & Audy, J. F. (2022). Evaluation of sourcing contracts in wood supply procurement using simulation. International Transactions in Operational Research, 29(1), 396-416.

Ranta, T., Korpinen, O. J., Jäppinen, E., & Karttunen, K. (2012). Forest biomass availability analysis and large-scale supply options. *Open Journal of Forestry*, *2*(1), 33-40.

Rauch, P. (2017). Developing and evaluating strategies to overcome biomass supply risks. Renewable Energy, 103, 561-569.

Rostami, O., Tavakoli, M., Tajally, A., & GhanavatiNejad, M. (2023). A goal programming-based fuzzy best–worst method for the viable supplier selection problem: a case study. Soft Computing, 27(6), 2827-2852.

Salleh, N. H. M., Abd Rasidi, N. A. S., & Jeevan, J. (2020). Lean, agile, resilience and green (LARG) paradigm in supply chain operations: a trial in a seaport system. Australian Journal of Maritime & Ocean Affairs, 12(4), 200-216.

Sarrazin, F., LeBel, L., & Lehoux, N. (2021). Regional logistics centre: Application to Eastern Canada. INFOR: Information Systems and Operational Research, 59(3), 439-464.

Schwab, O., Bull, G., & Maness, T. (2005). A mill-specific roundwood demand equation for southern and central Finland. Journal of forest economics, 11(2), 95-106.

Shabani, N., & Sowlati, T. (2013). A mixed integer non-linear programming model for tactical value chain optimization of a wood biomass power plant. Applied Energy, 104, 353-361.

Shahi, S., Pulkki, R., Leitch, M., & Gaston, C. (2017). Optimal production-inventory model for forest products industry supply chain under demand and supply uncertainty: Case study of a pulp mill in Ontario. Cogent Business & Management, 4(1), 1370765.

Shahriari, K., Hessami, A. G., Jadidi, A., & Lehoux, N. (2015). An approach toward a conceptual collaborative framework based on a case study in a wood supply chain. IEEE Systems Journal, 9(4), 1163-1172.

Simard, V., Rönnqvist, M., LeBel, L., & Lehoux, N. (2023). Stochastic programming to evaluate the benefits of coordination mechanisms in the forest supply chain. Computers & Industrial Engineering, 184, 109571.

Sopelana, A., Auriault, C., Bansal, A., Fifer, K., Paiva, H., Maurice, C., ... & Cañas, A. (2021). Innovative circular economy models for the European pulp and paper industry: a reference framework for a resource recovery scenario. Sustainability, 13(18), 10285.

Susilawati, D., & Kanowski, P. (2020). Cleaner production in the Indonesian pulp and paper sector: Improving sustainability and legality compliance in the value chain. Journal of Cleaner Production, 248, 119259.

Svensson, E., & Berntsson, T. (2014). The effect of long lead times for planning of energy efficiency and biorefinery technologies at a pulp mill. Renewable energy, 61, 12-16.

Szabó, L., Soria, A., Forsström, J., Keränen, J. T., & Hytönen, E. (2009). A world model of the pulp and paper industry: Demand, energy consumption and emission scenarios to 2030. Environmental Science & Policy, 12(3), 257-269.

Tereshkina, T. (2011). EFFICIENCY ESTIMATION OF PROCESSES IN SUPPLY CHAIN MANAGEMENT OF PULP AND PAPER PRODUCTION. LogForum, 7(4).

Toppinen, A., Pätäri, S., Tuppura, A., & Jantunen, A. (2017). The European pulp and paper industry in transition to a bio-economy: A Delphi study. Futures, 88, 1-14.

Torjai, L., Nagy, J., & Bai, A. (2015). Decision hierarchy, competitive priorities and indicators in large-scale 'herbaceous biomass to energy'supply chains. Biomass and Bioenergy, 80, 321-329.

Trzcianowska, M., Beaudoin, D., & LeBel, L. (2021). Approach of flexible log yard design using discrete event simulation. In Proceedings of the 20th International Conference on Modeling & Applied Simulation (MAS 2021) (pp. 48-56).

Trzcianowska, M., LeBel, L., & Beaudoin, D. (2019). Performance analysis of log yards using data envelopment analysis. International Journal of Forest Engineering, 30(2), 144-154.

Utomo, K. Y., Siswanti, I., Azis, N., & Prowanta, E. (2021). Determinant Factors Affecting Performance of Supply Chain in Pulp and Paper Industries During Pandemic Era in Indonesia. Turkish Journal of Computer and Mathematics Education, 12(3), 4406-4409.

Vafaeenezhad, T., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2016). Fuzzy multi-objective supply chain master planning in a wood and paper industry: A case study. IFAC-PapersOnLine, 49(12), 1632-1637.

Vafaeenezhad, T., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Cheikhrouhou, N. (2019). Multi-objective mathematical modeling for sustainable supply chain management in the paper industry. Computers & industrial engineering, 135, 1092-1102.

Vitale, I., Dondo, R. G., González, M., & Cóccola, M. E. (2022). Modelling and optimization of material flows in the wood pellet supply chain. Applied Energy, 313, 118776.

Vosooghidizaji, M., Taghipour, A., & Canel-Depitre, B. (2020). Supply chain coordination under information asymmetry: a review. International Journal of Production Research, 58(6), 1805-1834.

Waldemarsson, M., Lidestam, H., & Rudberg, M. (2013). Including energy in supply chain planning at a pulp company. Applied energy, 112, 1056-1065.

Wankmüller, C., & Reiner, G. (2020). Coordination, cooperation and collaboration in relief supply chain management. Journal of Business Economics, 90, 239-276.

Weigel, G., D'Amours, S., & Martel, A. (2009). A modeling framework for maximizing value creation in pulp and paper mills. INFOR: Information Systems and Operational Research, 47(3), 247-260.

Windisch, J., Väätäinen, K., Anttila, P., Nivala, M., Laitila, J., Asikainen, A., & Sikanen, L. (2015). Discrete-event simulation of an information-based raw material allocation process for increasing the efficiency of an energy wood supply chain. Applied energy, 149, 315-325.

Wu, K. J., Theja, H., Vincent, I., Poerwanto, C., Rosario, E., Ferreira, R. D., & Tatiyathavornkul, S. (2024). Structuring an influential model for Indonesian pulp and paper circular supply chain practices. International Journal of Logistics Research and Applications, 27(1), 6-29

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Flexibility in Transportation to Enhance Wood Delivery Precision

NILOOFAR JAHANI[1], LUC LEBEL[2], SHUVA HARI GAUTAM[3]

[1] PhD candidate (Département des sciences du bois et de la forêt)
Abitibi-Price Pavillon, 2405, rue de la Terrasse (SBF-forestry and GGR-geography), Québec (Canada)
niloofar.jahnai.1@ulaval.ca

[2] Professeur titulaire (Département des sciences du bois et de la forêt)
Abitibi-Price Pavillon, 2405, rue de la Terrasse (SBF-forestry and GGR-geography), Québec (Canada)
luc.lebel@sbf.ulaval.ca

[3] Professeur adjoint (Département des sciences du bois et de la forêt)
Abitibi-Price Pavillon, 2405, rue de la Terrasse (SBF-forestry and GGR-geography), Québec (Canada)
shuva-hari.gautam@sbf.ulaval.ca

Résumé

L'approvisionnement en bois gère le mouvement des fibres des forêts aux usines, assurant la livraison du bon produit au bon client, au bon moment et au bon coût. Cependant, des facteurs comme la météo imprévisible, des données forestières imprécises et des contraintes de transport compliquent la synchronisation des livraisons avec la production des scieries. Cette étude explore des stratégies pour améliorer la flexibilité du transport face aux variations de l'offre. Un modèle MILP est développé pour maximiser la rentabilité d'un réseau de scieries et de cours de transbordement. Il évalue l'adaptabilité de la flotte dans divers scénarios saisonniers (accumulation, dégel, équilibre). Les résultats montrent que l'ajustement dynamique de la flotte absorbe les fluctuations de l'offre et améliore la précision des livraisons. L'usage des cours de transbordement comme stock intermédiaire renforce encore la souplesse de la chaîne d'approvisionnement. L'optimisation du modèle permet d'évaluer la nécessité d'une capacité supplémentaire ou d'une réduction des opérations, en tenant compte des coûts et contraintes logistiques. Les bénéfices augmentent de 43,3 % en période d'accumulation, de 10,08 % en dégel et de 4,85 % en équilibre, soulignant l'efficacité des ajustements dynamiques et des points de stockage stratégiques.

Abstract

Wood procurement involves managing the movement of fiber from forests to mills, ensuring the right product reaches the right customer at the right time and cost. Wood procurement planning is influenced by unpredictable weather changes, inaccurate forest inventory data, and transportation limitations. These challenges make it difficult to synchronize raw material deliveries with sawmill production plans. This study explores strategies to gain flexibility in transportation considering supply fluctuations. A Mixed Integer Linear Programming (MILP) model is developed to maximize profitability across a network of sawmills and transshipment yards. The deterministic model evaluates fleet adaptability under different seasonal scenarios, including accumulation, thawing, and equilibrium periods. The results demonstrate that dynamic fleet adjustments can absorb log supply fluctuations and improve delivery precision by incorporating transshipment yards. Utilization of transshipment yards as strategic intermediate storage points in accumulation periods further enhances supply chain agility. The optimization model in different scenarios helps determine whether additional capacity is needed, or operations should be scaled back. However, constraints such as transportation costs, limited storage, and geographical distribution must be considered. Results demonstrate 43.3% improvement in profit during accumulation periods. This number for thawing and equilibrium periods is 10.08% and 4.85%, respectively.

Mots clés **- Approvisionnement en bois, chaîne d'approvisionnement en bois, cour de transbordement, flexibilité du transport, optimisation.**

Keywords **– Wood procurement, Wood supply chain, Transshipment yard, Transportation flexibility, optimization.**

1 INTRODUCTION

Wood procurement planning is a complex logistical challenge. It requires managing wood flow from forest to the mill. Wood flow management can be simplified as delivering the right product at the right time to the right customer for the right price. Successful procurement requires careful planning of wood flow related decisions such as purchasing, harvesting, transportation, and storage. However, wood procuring from the forest is influenced by uncertainties such as unpredictable weather changes, inaccurate forest inventory data, variable system productivity, and fluctuating market demand. These sources of uncertainties make it difficult to synchronize raw material deliveries with sawmill production plans and customer orders.

The global wood industry is a significant economic force, with the export value of wood products reaching USD 482 billion in 2023(GlobeNewswire., 2024). With a forest area of 3,469,000 km^2, Canada is a major supplier of certified forest products (Canada, 2013). Over 26% of this forest area is located in the province of Québec, the largest province in Canada (*Chiffres-clés du Québec forestier - Édition 2023*). In such a large province, harvested wood travel long distances before it reaches

the transformation mills. Hence, transportation costs account for a large portion of wood supply chain (WSC) expenses.

Transportation management requires planning for decisions concerning delivery time and cost, modes of transportation, truck type and quantity, road construction, routing and allocation, volume per species, and cooperation. Factoring in uncertainty makes wood transportation management an intricate challenge. A major source of uncertainty that affects transportation activities is supply seasonality.

Seasonal restrictions can significantly deviate wood availability throughout the year. In addition, the upstream level of the WSC often include multiple supply sources, each with different levels of uncertainty (Simard et al., 2024). It is therefore difficult for procurement managers to control lead time of each assortment throughout the year. For instance, a "push" approach is used during favorable harvesting period. In this production-oriented period, considerable volumes of wood are harvested and transported, leading to rapidly increasing inventory in stockyards (Hoogstra-Klein & Meijboom, 2021). Another name for such period, according to Trzcianowska et al. (2021) is "accumulation season". During the accumulation season, the volume of logs delivered to each yard is greater than consumption. There is another period that is called the "thawing season," which mostly happens in the spring. During this time, the snow and ice in the road structure begin to melt, decreasing the bearing capacity of the roads and thus decreasing the payload of trucks or halting hauling operations. These fluctuation in supply availability further affects the inventory level for specific species in each storage points impacting delivery lead time. Wood procurement managers must therefore account for these major seasonal variations when managing wood flow and maintaining inventories to control lead time.

A characteristic of supply chain management which respect the delivery time and commitments despite multiple sources of uncertainty is called "agility" (Audy et al., 2013; Gligor, 2016). Agility can be defined as the supply chain capability to adapt and respond rapidly to market changes, including opportunity or disturbances caused by uncertainties. In other words, agility is a combination of flexibility and responsiveness of the system (Audy et al., 2013). An acceptable level of agility would be developed by collaborating supply, logistics, planning, and information technology (Gautam et al., 2013; Hoogstra-Klein & Meijboom, 2021). Johansson et al. (2022) have demonstrated that flexibility in forest harvesting capacity improves the agility capability of the WSC (Johansson et al., 2022). Flexibility can be defined as the adaptation to variations and changes in customer needs. Changes in the scheduled cutting plan, adding or reducing trucks to increase fleet capacity, immediate adjustment of wood assortments, and shortening or lengthening of time for harvesting or transportation are examples of ways to add flexibility in WSC. Flexibility in fleet capacity, which has the potential to enhance the system's agility capability, has not been addressed adequately in the literature.

This paper attempts to explore means to leverage flexibility in transportation fleet capacity considering different seasonal scenarios. Proper adjustments of material flows from forest to mills can contribute to better control of lead times. In this regard, a mixed integer linear programming (MILP) optimization model is developed to maximize profitability across a network of sawmills and transshipment yard. With a primary focus on optimizing transportation costs, the deterministic model considers different scenarios of wood availability to find the optimal usage of trucks in each scenario. Then, a comparison of these scenarios with non-flexible fleet capacity is demonstrated. The study offers insights into how managing transportation operations with transshipment yard for different supply scenarios can impact a company's profitability.

The rest of this paper is organized as follows; section 2, presents a review of the related literature. The problem is described in more detail in section 3. The mathematical model considering the assumptions and modeling is presented in section 4. Section 5 presents the results and discussion followed by conclusion in section 6.

2 LITERATURE REVIEW

The upstream level of WSC has always been under the effect of supply uncertainty (Gautam et al., 2013). The supply uncertainty has a direct effect on supply chain performance. It implies that in some seasons, the right product might not be readily available. One possible solution is to keep the inventory in stockpiles at or near the consumption points. However, this strategy may increase the chance of storing products that differ from what clients require, leading to missed sales opportunities or unsold products in the storage yard (Gaudreault et al., 2007). The other solution is a method to shorten the order fulfillment time, which is a critical characteristic of high-performing WSC and is called "agility" (Audy et al., 2013). There are different ways to improve agility in WSC. According to Gautam et al. (2013), agility can be improved in business units by applying collaboration within supply network. For example, backhauling in wood transportation is a collaborative approach between companies that improves agility capability in a network (Palander, 2022). To be more agile in the WSC, another way is to satisfy individual customers, which is called "responsiveness" (Erdogan Aktan, 2017; Gautam & LeBel, 2018; Wikner et al., 2015). To be more responsive to the customers' demands, flexibility and adaptability are required in the system (Erdogan Aktan, 2017).

To increase flexibility and decrease fixed costs, forest companies may prefer to outsource logging and transporting activities to contractors (Drolet & LeBel, 2010; Eriksson et al., 2015; Johansson et al., 2022). Thus, it is now common practice to hire independent contractors to cut and transport the logs from the forest to the mills. Adding or removing contractors, changes in their cutting plan, and adding or reducing trucks to increase fleet capacity are examples of flexibility in the WSC system through contractor management (Johansson et al., 2021). Flexibility in transportation fleet capacity has been rarely investigated in the literature. Chauhan et al. (2009) developed a large-scale mixed integer programming model to minimize combined harvesting and aggregated transportation costs under demand satisfaction. They addressed a short-term supply network planning problem to decide on product type to be sourced from pre-selected blocks and dispatched to several mills. François et al. (2017) proposed a tactical planning model that optimizes timber sourcing under aggregated transport capacity. Considering a case study, they evaluated timber transport collaborative scenarios and developed a planning model to benchmark various collaborative executions of a tactical transport plan. Other studies by Béland et al. (2024b, 2024a) evaluated various collaborative approaches aimed at minimizing logistics costs and thereby maximizing the sustainability of the network. Sarrazin et al. (2018) aimed to diagnose the parameters that impact the profitability of a regional logistics center regarding the sorting yard and the sharing of transportation resources. Nevertheless, the application of dynamically adjusting the number of trucks based on seasonal fluctuations in log supply didn't receive the attention it deserved.

Furthermore, transshipment yards, also known as terminals, are introduced to enhance the system's agility and absorb the shocks of fluctuating customer demand (Vitale et al., 2024). These storage points in the WSC allow wood to be temporarily stored or redirected. During accumulation seasons, companies often increase inventory levels in transshipment yards to prepare for thawing periods when certain forest areas become inaccessible. This strategy ensures a steady wood flow even when direct access to logging sites is limited (Iv et al., 2018). However, the use of transshipment yards introduces additional costs and logistical considerations. Incorporating transshipment yards into the WSC requires a strategic approach to ensure that the advantages in terms of supply chain agility and demand responsiveness outweigh the operational expenses. While previous studies have focused on optimizing transportation and inventory management at mill yards or roadside storage, the potential of transshipment yards to improve flexibility and adaptability in fleet operations remains largely underexplored.

3 PROBLEM DESCRIPTION

The transportation process begins once logs are harvested and stored at roadside inventory points. Depending on wood accessibility and market price the logs can either be transported directly to the sawmill or routed through transshipment yards. Transshipment yards serve as buffer storage points that allow for adjustments to fleet capacity, mitigating supply disruptions and optimizing flow management. In the accumulation season, when there is a massive volume of wood to be stored, forest companies prefer to build transshipment yards, focusing on operational efficiency. Conversely, during the thawing period, poor road conditions reduce the payload capacity of trucks, limiting the volume of logs that can be transported. Such seasonal constraints necessitate a dynamic fleet management approach to balance transportation capacity with fluctuating supply and demand.

This study proposes a mathematical optimization model to determine whether profitability could be improved by implementing flexibility in transportation fleet capacity. The model simulates different supply scenarios to assess whether adjusting the fleet size in response to seasonal variations can contribute to maximizing demand fulfillment. Meanwhile, other decision variables include the volume transported, inventory levels in each storage point, and the amount of lumber production.

Figure 1 is a simplified version of the procurement process for a single sawmill. Our case study includes a network of sawmills (four mills) with multiple forest areas (two) and transshipment yards (two). The model determines whether additional capacity is required, or transportation operations should be scaled down.

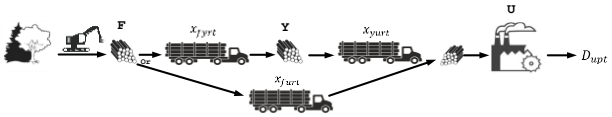


Figure 1-Wood procurement components for a sawmill

4 MATHEMATICAL MODEL

A Mixed Integer Linear Programming (MILP) optimization model was developed to maximize profitability across a network of sawmills and satellite wood terminals. The model guides decision makers in adjusting fleet capacity for a set of supply scenarios.

The model operates over a four-week horizon with weekly periods. It considers three different softwood species, two harvest areas, and two transshipment yards supplying four sawmills. It aims to determine the optimal number of trucks required in different supply scenarios while respecting logistical constraints and minimizing transportation costs. The model then runs over the same scenarios without considering the dynamic flexibility adjustment of trucks.

4.1 Assumptions

The proposed model is based on a hypothetical network of four sawmills. The distances separating the harvest areas to the mills are typical distances observed in Québec, ranging between 50 and 325 km. Figure 2 represents the average distance in logistic network.

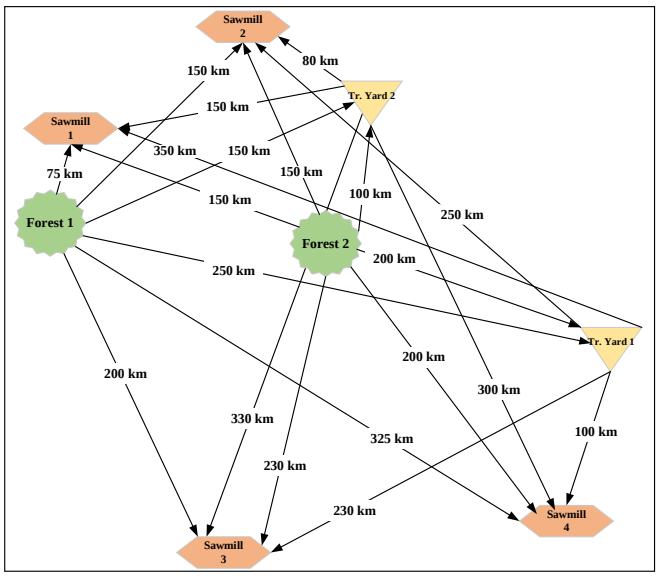


Figure 2-Schematic of the logistic network used for the optimization model

When developing the model, we assumed that each roadside contains the same three wood species but in different proportions. Once harvested, wood is kept at roadside until it is picked up by a truck and sent to a mill. The harvested log can either be:

- Stored at the roadside until transported,
- Shipped to a transshipment yard as an intermediate storage point,
- Directly transported ("hot logging") to a sawmill.

Our operational level model assumes that the available location and opening of transshipment yards in each period are predetermined at the tactical level. In this model we considered homogeneous truck fleet as the only mode of transportation. In addition, the number of available trucks is known at the beginning of the optimization. The model will then determine the number of trucks that are required to be added or reduced from the fleet capacity to attain optimality. To analyze the effect of fleet adjustment on the network and companies' profitability, three supply scenarios were tested: Scenario1- accumulation (push) season; with high wood availability, Scenario2- spring thawing season; with low log availability, Scenario 3- equilibrium season; with stable wood availability. These scenarios were tested in truck flexibility and non-flexibility state. The summary of scenarios with their considerations are presented in Table 1.

Table 1-Assumptions in each scenario

Scenarios	Initial Inv. of forest	Initial Inv. of trans. yard	Initial Inv sawmill	Available supply
Scenario 1	Medium	Zero	Equals safety stock	High
Scenario 2	Zero	Zero	Equals safety stock	Low
Scenario 3	Low	Low	Lower than safety stock	Stable

The deterministic optimization model was tested under these scenarios to assess how flexibility in fleet capacity influences profitability and the volume of committed demand.

4.2 Modeling

The mathematical model used to optimize the sawmill network is presented in this section.

Sets

F: Set of forest roadsides
Y: Set of transshipment yards
U: Set of sawmills
R: Set of species
P: Set of products
T: Set of periods (weeks)

Parameters

Av_{frt} Supply available in forest roadsides *f*, for species *r*, at period *t*.
In_{fr} Initial inventory level for species *r*, in forest roadsides *f*.
In_{yr} Initial inventory level for species *r*, in transshipment yard *y*.
Ca_{yt} Storage capacity of transshipment yard *y* at period *t*.
Ca_{ut} Storage capacity of sawmill yard *u* at period *t*.
In_{ur} Initial inventory level for species *r*, in sawmill *u*.
SS_{ur} Safety stock for species *r*, in sawmill *u*.
PCa_{ut} Processing capacity of sawmill *u* at period *t*.
β_{urp} Production conversion rate of sawmill *u* for species *r*, convert to product *p*.
Dis_{fy} Distance between forest roadsides *f* and transshipment yard *y*.
Dis_{yu} Distance between transshipment yard *y* and sawmill yard *u*.
Dis_{fu} Distance between forest roadsides *f* and sawmill yard *u*.
Tt Total number of trucks available for modelization.
Sp_{fy} Average speed of trucks between forest roadsides *f* and transshipment yard *y*.
Sp_{yu} Average speed of trucks between transshipment yard *y* and sawmill yard *u*.
Sp_{fu} Average speed of trucks between forest roadsides *f* and sawmill yard *u*.
$Payl_{rt}$ Payload of each truck for species *r*, at period *t*.
Ta_t Total time each truck has available, at period *t*.
InC_{ft} Inventory cost in forest roadsides *f*, at period *t*.
InC_{yt} Inventory cost in transshipment yard *y*, at period *t*.
InC_{ut} Inventory cost in sawmill *u*, at period *t*.
TC_t Transportation cost, at period *t*.
Add_t Adding truck cost, at period *t*.
Red_t Reducing truck cost, at period *t*.
Re_{upt} Unit revenue for each product *p* in sawmill *u*, at period *t*.

Variables

D_{upt} The volume of committed demand for product *p* at mill *u*, at period *t*.
Rt_t The number of trucks required at period *t*.
$UnderUsage_t$ The under-usage number of trucks at period *t*.
$OverUsage_t$ The over-usage number of trucks at period *t*.
Tr_{fyrt} The number of trips from *f* to *y* for species *r*, at period *t*.
Tr_{yurt} The number of trips from *y* to *u* for species *r*, at period *t*.
Tr_{furt} The number of trips from *f* to *u* for species *r*, at period *t*.
X_{fyrt} Volume of wood transported from *f* to *y* for species *r*, at period *t*.
X_{yurt} Volume of wood transported from *y* to *u* for species *r*, at period *t*.
X_{furt} Volume of wood transported from *f* to *u* for species *r*, at period *t*.
H_{frt} Inventory level in the forest roadsides *f* for species *r*, at period *t*.
H_{yrt} Inventory level in the transshipment yard *y* for species *r*, at period *t*.
H_{urt} Inventory level in the sawmill yard *u* for species *r*, at period *t*.
V_{urt} The volume of raw material *r* that will be processed at sawmill *u*, at period *t*.

Objective function

Max Profit:

$$\sum_U\sum_P\sum_T Re_{upt}.D_{upt} - [\sum_F\sum_R\sum_T H_{frt}.InC_{ft} + \sum_Y\sum_R\sum_T H_{yrt}.InC_{yt} + \sum_U\sum_R\sum_T H_{urt}.InC_{ut} + \sum_F\sum_Y\sum_R\sum_T Tr_{fyrt}.Dis_{fy}.TC_t + \sum_Y\sum_U\sum_R\sum_T Tr_{yurt}.Dis_{yu}.TC_t + \sum_F\sum_U\sum_R\sum_T Tr_{furt}.Dis_{fu}.TC_t + \sum_T OverUsage_t.AddC_t + \sum_T UnderUsage_t.RedC_t] \quad (1)$$

The objective function is to maximize the profit for the forest company that owns the network of mills. Adding trucking capacity in the system of transportation will add more cost to the model. Therefore, we prevent the model from adding trucks liberally. Eq. 1 shows the objective function.

Constraints

Subject to,

$$In_{fr} + H_{fr(t-1)} - \sum_Y X_{fyrt} - \sum_U X_{furt} + Av_{frt} = H_{frt} \qquad \forall f,r,t \quad (2)$$

$$In_{yr} + H_{yr(t-1)} + \sum_F X_{fyrt} - \sum_U X_{yurt} = H_{yrt} \qquad \forall y,r,t \quad (3)$$

$$In_{ur} + H_{ur(t-1)} + \sum_F x_{furt} + \sum_Y x_{yurt} - V_{urt} = H_{urt} \qquad \forall u,r,t \quad (4)$$

Eq. 2, 3, and 4 are flow conservation constraints balancing inbound and outbound wood flow at roadside, transshipment yards, and mill yards

$$\sum_R H_{yrt} \le Ca_{yt} \qquad \forall y,t \qquad (5)$$

$$\sum_R H_{urt} \le Ca_{ut} \qquad \forall u,t \qquad (6)$$

$$H_{urt} \ge SS_{ur} \qquad \forall u,r,t \qquad (7)$$

Eq. 5 and 6 are capacity constraints ensuring that the inventories in each node do not exceed the limit. We do not define the same constraints for roadsides because we assume no inventory capacity limit in the forest. Eq. 7 covers the safety stock in the mill yard.

$$Tr_{fyrt} \ge \frac{x_{fyrt}}{Payl_{rt}} \qquad \forall f,y,r,t \qquad (8)$$

$$Tr_{yurt} \ge \frac{x_{yurt}}{Payl_{rt}} \qquad \forall y,u,r,t \qquad (9)$$

$$Tr_{furt} \ge \frac{x_{furt}}{Payl_{rt}} \qquad \forall f,u,r,t \qquad (10)$$

Eq. 8, 9, and 10 calculate the number of trips in each of the routes. This integer number is computed by dividing the volume of the log transported by the truck payload.

$$UnderUsage_t - OverUsage_t = Tt - Rt_t \qquad \forall t \qquad (11)$$

$$\mathrm{Rt_t} \ge \frac{(\sum_F \sum_Y \sum_R Tr_{fyrt} * {}^{Dis_{fy}}/_{Sp_{fy}} + \sum_Y \sum_U \sum_R Tr_{yurt} * {}^{Dis_{yu}}/_{Sp_{yu}} + \sum_F \sum_U \sum_R Tr_{furt} * {}^{Dis_{fu}}/_{Sp_{fu}})}{\mathrm{Ta_t}} \qquad \forall t \qquad (12)$$

Eq. 11 and 12 compute the transportation usage of trucks and the number of trucks required. Distance divided by speed in Eq. 12 provides the time it takes for each trip (travel time). Multiplying the travel time to the number of trips gives us the total time for trucks between each node. Aggregating the total time between nodes and then dividing it to the total time each truck has available provides the number of trucks required in the network. For simplification, we considered the trucks to be homogeneous.

$$\sum_R V_{urt} \le PCa_{ut} \qquad \forall u,t \qquad (13)$$

$$\beta_{urp}.V_{urt} \ge D_{upt} \qquad \forall \mathrm{u},p,t \qquad (14)$$

$$D_{upt}, x_{fyrt}, x_{yurt}, x_{furt}, H_{frt}, H_{yrt}, H_{urt}, V_{urt} \ge 0 \qquad (15)$$

$$\mathrm{Rt_t}, UnderUsage_t, OverUsage_t, Tr_{yurt}, Tr_{yurt}, Tr_{furt} \in Z \qquad (16)$$

Eq. 13 ensures that production at each mill, in each period, does not exceed its processing capacity. Eq. 14 maximizes the amount of demand fulfillment. Finally, Eq. **Error! Reference source not found.** and 16 ensure the non-negativity and integer nature of the variables, respectively.

4.3 Modifications required for non-flexible scenarios

For applying the non-flexible scenario of the model, the cost of over- and under-usage of truck eliminated from the objective function. Thus, the objective function 1 was replaced by Eq. 17. The constraint related to over- and under-usage of trucks (Eq. 11) was also replaced by Eq.18.

$$\text{Max Profit:} \quad \sum_U \sum_P \sum_T Re_{upt}.D_{upt} - [\sum_P \sum_R \sum_T H_{frt}.InC_{ft} + \sum_Y \sum_R \sum_T H_{yrt}.InC_{yt} + \sum_U \sum_R \sum_T H_{urt}.InC_{ut} + \sum_F \sum_Y \sum_R \sum_T Tr_{fyrt}.Dis_{fy}.TC_t + \sum_Y \sum_U \sum_R \sum_T Tr_{yurt}.Dis_{yu}.TC_t + \sum_F \sum_U \sum_R \sum_T Tr_{furt}.Dis_{fu}.TC_t] \qquad (17)$$

$$Tt = Rt_t \qquad \forall t$$

5 RESULTS AND DISCUSSION

In this section, results are presented for each seasonal scenario, considering the flexible and non-flexible state of the transportation fleet. A comparative analysis of the three scenarios for the volume of committed demand and truck usage is included at the end of this section.

5.1 Accumulation Season (Push)

During the accumulation season, when log availability is at its peak, as expected, the inventory levels are high at each storage point. In the flexible state, since we force the model to bring most of the wood from the forest and pile it up in the transshipment yard or mill yard, the inventory level for the roadside was at the lowest. The number of trucks usage at T1 is at its maximum (see Figure 3) since there are no initial inventory in the transshipment yard and by adding trucks the volume of committed demand increased compare to the state where adding truck is not allowed (see Figure 4). The trend of adding more trucks to the network diminish later since the inventory were distributed between transshipment yards and mill yards, causing the overall committed demand to increase gradually. A comparison between the profit improvement in the first scenario (accumulation season) in two flexibility states (Table 4) clearly shows that by adding the trucks and transfer the woods to points closer to mills (lower lead time) the whole system gained 43.03% more profit.

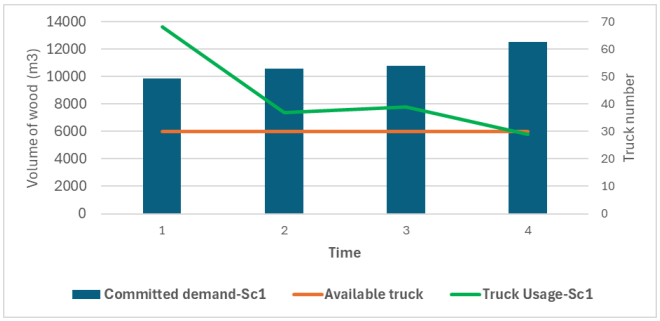


Figure 3-The trade-off between the volume of committed demand and the number of trucks used in Acc. (accumulation) season, flexible state

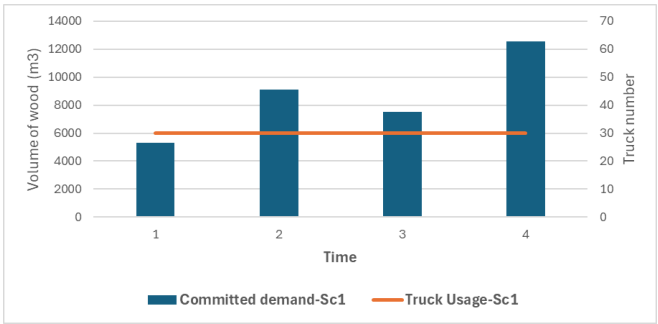


Figure 4-The trade-off between the volume of committed demand and trucks used in Acc. (accumulation) season, non-flexible state

5.2 Thawing Season (Supply Constraints)

In the thawing season, log availability is significantly reduced due to restricted access to forest roads. The initial inventory in the transshipment yard was zero, and inventory level in this

strategic storage point remain zero for the whole period since there are safety stuck in the mill yard, and we force the model to empty the roadside and maximize the demand. Hence, almost all inventories stored at the mill yard. With lower number of truck usage (see Figure 5) compared to available trucks, the quantity of committed demand decreased. Nevertheless, using a smaller number of trucks lead to more profit (Table 4) compared to the non-flexible state. In this scenario, almost all the available supply delivered to the mill yard with a smaller number of trucks. With this strategy the model tried to maximize the demand that leads to improve the responsiveness of the system. This scenario highlights the importance of initial inventory in transshipment yards to sustain operations when supply is constrained.

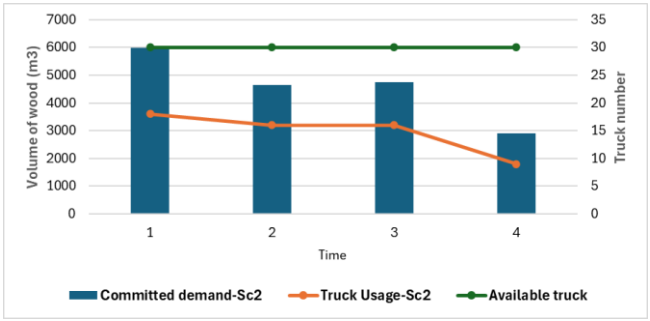


Figure 5-The trade-off between the volume of committed demand and the number of trucks used in thawing season, flexible state

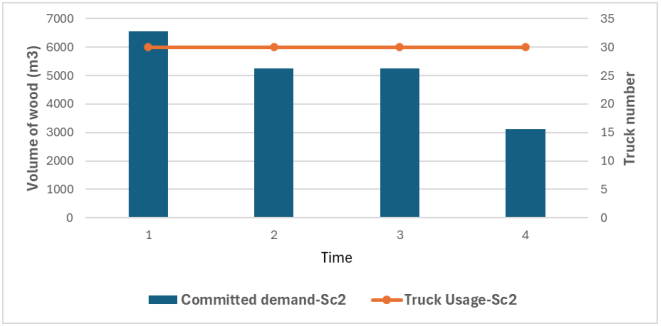


Figure 6-The trade-off between the volume of committed demand and trucks used in thawing season, non-flexible state

5.3 Equilibrium Season (Stable Supply)

In the equilibrium season, supply availability is stable. In this scenario, adding flexibility to the model improves the profitability by 4.85% (Table 4). However, through time, when the model is allowed to add trucks, the committed demand increased. In such period, the volumes delivered to the mill yard maximize the sawmill demand. As a result, most of the inventory in the sawmill yard was maintained. In the flexible state, the inventory of the transshipment yard increased in the first two weeks and dropped for the remainder of the periods due to delivery of wood to mill yards. Staying with a strict number of trucks in a non-flexible state imposed high inventory costs on the roadside. By accumulating wood on the roadside and not transporting it to the mill because of low transport capacity, inventory costs increased. The equilibrium scenario demonstrates that fleet flexibility ensures operational efficiency without excessive truck usage, optimizing cost and committed demand.

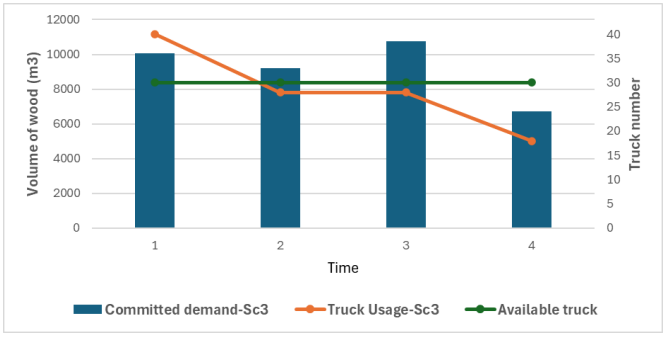


Figure 7-The trade-off between the volume of committed demand and the number of trucks used in equilibrium season, flexible state

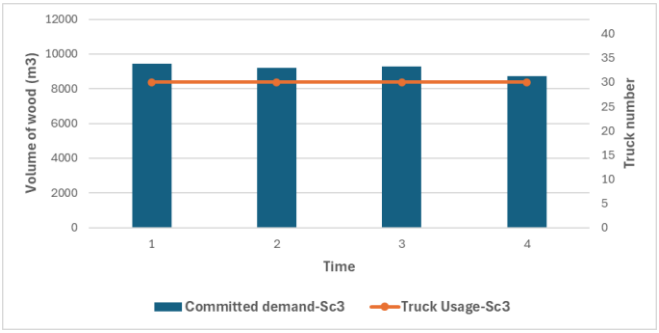


Figure 8-The trade-off between the volume of committed demand and the number of trucks used in equilibrium season, non-flexible state

5.4 Comparative Insights and Practical Implications

The number of trips between nodes in each scenario together with the profit improvement are shown in Table 2, Table 3, and Table 4 for flexible and non-flexible state.

Table 2-Results for the number of trips and profit in flexible state

Scenarios	Numbers of trips		
	Forest (F) to Transshipment (Y)	Transshipment (Y) to mill (U)	Forest (F) to mill (U)
Scenario1	1078	256	2903
Scenario2	0	0	1600
Scenario3	411	381	2516

Table 3-Results for the number of trips and profit in non-flexible state

Scenarios	Numbers of trips		
	Forest (F) to Transshipment (Y)	Transshipment (Y) to mill (U)	Forest (F) to mill (U)
Scenario1	661	145	2694
Scenario2	0	0	1949
Scenario3	140	135	2764

Table 4-The improvement in profit for each scenario by applying flexibility in fleet capacity

Scenarios	Improvement in profit (%)
Scenario1	43.03%
Scenario2	10.08%
Scenario3	4.85%

Meanwhile, Figure 9 and Figure 10 presents the comparison between the quantity of committed demand in three scenarios in flexible and non-flexible state, respectively. As was expected, in the second scenario (thawing season), the amount of committed demand was at the lowest in both states. Figure 11 shows truck usage in different scenarios in comparison with the available number of trucks over time. As anticipated, the lowest truck usage was during the thaw period, and the most usage occurred under the first scenario. The findings emphasize that adaptive fleet scheduling and transshipment yards improve supply chain profitability and responsiveness. Decision-makers can leverage such a model to adjust truck deployment dynamically, ensuring cost efficiency and demand fulfillment under varying seasonal conditions.

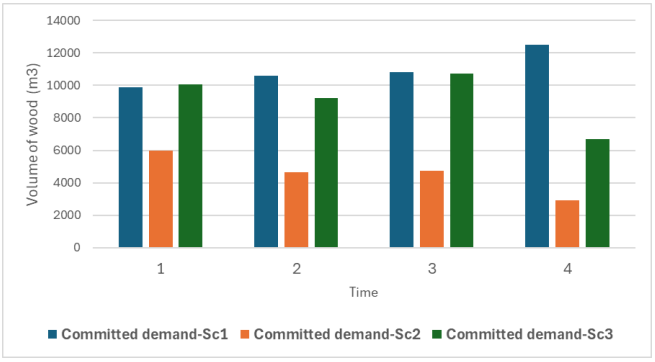


Figure 9-The comparison between the volume of committed demand in different scenarios, the flexible state

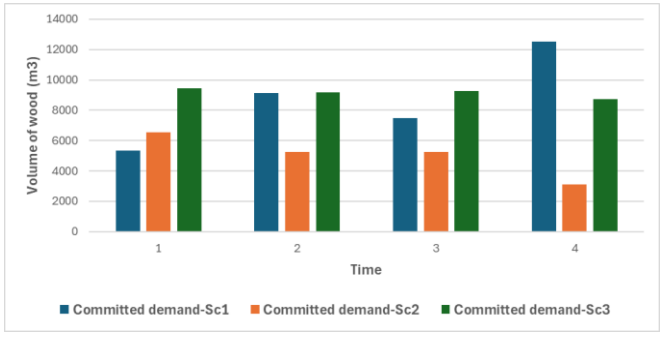


Figure 10-The comparison between the volume of committed demand in different scenarios, the non-flexible state

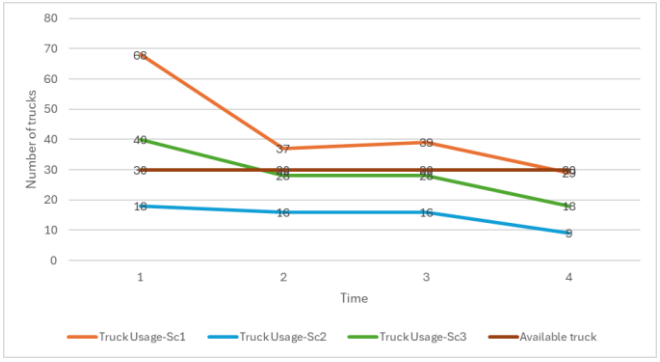


Figure 11-The number of truck usage in in different scenarios in flexible state

6 Conclusion

This study investigates the role of transportation fleet capacity flexibility to optimize flow management in the wood supply chain (WSC). Given the complexities introduced by seasonal fluctuations, supply uncertainty, and transportation constraints, the research focused on developing a Mixed Integer Linear Programming (MILP) optimization model to enhance system adaptability and improve delivery precision.

The results demonstrate that adjusting fleet capacity dynamically in response to seasonal variations improves supply chain profitability. During the accumulation season, transshipment yards play a critical role in buffering excess supply and ensuring steady distribution. In contrast, during the thawing period, road accessibility limitations emphasize the necessity of a certain level of inventory to sustain mill operations. The equilibrium season shows the benefits of fleet adaptability, balancing transportation efficiency to maintain profitability.

A key finding of this study is that incorporating fleet flexibility allows the system to absorb fluctuations in log availability, reducing disruptions and ensuring continuous operations. Moreover, the use of transshipment yards enhances agility by serving as intermediate storage points, allowing companies to adjust transportation schedules dynamically. The results show that by integrating adaptive fleet scheduling, inventory allocation, and transshipment yards, companies can achieve lower transportation costs, reduced lead time variability, and improved order fulfillment demand rates.

Future research should explore real-time transportation adjustments, multi-modal logistics solutions, and the integration of harvesting team flexibility to further enhance the adaptability of the WSC. Additionally, incorporating stochastic optimization techniques could provide a more comprehensive decision-support system for procurement managers.

7 Remerciements

The authors thank the FORAC Research Consortium of Université Laval for their financial support.

8 References

Audy, J.-F., LeBel, L., Pinotti, M., Westlund, K., D'Amours, S., & Rönnqvist, M. (2013). Planning Systems, Agility and Customisation in Wood Supply Chains – Results from Six International Case Studies. *2013 Council on Forest Engineering Annual Meeting*, 8.

Béland, Y., Lehoux, N., & Lebel, L. (2024a). *Impacts of inter-firm collaboration for supply networks harvesting mixed forests*. 6 pages. https://doi.org/10.21872/2024IISE_7930

Béland, Y., Lehoux, N., & Lebel, L. (2024b). Inter-firm Collaborative Logistics: Literature Review in the Forest Sector. In Y. Benadada, F.-Z. Mhada, J. Boukachour, F. Ouzayd, & A. El Hilali Alaoui (Eds.), *Proceeding of the 7th International Conference on Logistics Operations Management, GOL'24* (pp. 377–387). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68628-3_36

Canada, R. naturelles. (2013, July 10). *Aperçu de l'industrie forestière du Canada*. Ressources naturelles Canada. https://ressources-naturelles.canada.ca/nos-ressources-naturelles/forets/industrie-commerce/apercu-lindustrie-forestiere-canada/13312

Chauhan, S. S., Frayret, J.-M., & LeBel, L. (2009). Multi-commodity supply network planning in the forest

supply chain. *European Journal of Operational Research*, *196*(2), 688–696. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.03.024

Chiffres-clés du Québec forestier—Édition 2023. (2023).

Drolet, S., & LeBel, L. (2010). Forest harvesting entrepreneurs, perception of their business status and its influence on performance evaluation. *Forest Policy and Economics*, *12*(4), 287–298. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2009.11.004

Erdogan Aktan, H. (2017). Evaluating the Weights of Criteria for Decoupling Point Positioning. *New Trends and Issues Proceedings on Humanities and Social Sciences*. 5th World Conference on Business, Economics and Management (BEM-2016), Istanbul Limak Limra Hotel & Resort, Convention Center Kemer, Antalya-Turkey.

Eriksson, M., LeBel, L., & Lindroos, O. (2015). Management of outsourced forest harvesting operations for better customer-contractor alignment. *Forest Policy and Economics*, *53*, 45–55. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2015.01.002

François, J., Moad, K., Bourrières, J.-P., & Lebel, L. (2017). A tactical planning model for collaborative timber transport. *IFAC-PapersOnLine*, *50*(1), 11713–11718. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1695

Gaudreault, J., Frayret, J.-M., & Pesan. (2007). Discrepancy-based optimization for distributed supply chain operations plannin. *Ninth International Workshop on Distributed Constraint Reasoning (DCR 2007)*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.researchgate.net/profile/Jonathan-Gaudreault/publication/233777653_Discrepancy-based_Optimization_for_Distributed_Supply_Chain_Operations_Planning/links/02e7e520e6a338e32d000000/Discrepancy-based-Optimization-for-Distributed-Supply-Chain-Operations-Planning.pdf

Gautam, S., & LeBel, L. (2018). Leagile strategy implementation in supplying forest raw materials to the bioeconomy. *Journal of Science & Technology for Forest Products and Processes*, *6*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.researchgate.net/profile/Shuva-Gautam/publication/318184499_Leagile_strategy_implementation_in_supplying_forest_raw_materials_to_the_bioeconomy/links/5a957c9d0f7e9ba42972ac3a/Leagile-strategy-implementation-in-supplying-forest-raw-materials-to-the-bioeconomy.pdf

Gautam, S., LeBel, L., & Beaudoin, D. (2013). Agility capabilities in wood procurement systems: A literature synthesis. *International Journal of Forest Engineering*, *24*(3), 216–232. https://doi.org/10.1080/14942119.2013.851367

Gligor, D. M. (2016). The Role of Supply Chain Agility in Achieving Supply Chain Fit. *Decision Sciences*, *47*(3), 524–553. https://doi.org/10.1111/deci.12205

GlobeNewswire. (2024). *Global forest products facts and figures 2023 shows fall in global trade in wood and paper products*. Newsroom. https://www.fao.org/newsroom/detail/global-forest-products-facts-and-figures-2023-shows-fall-in-global-trade-in-wood-and-paper-products/en

Hoogstra-Klein, M. A., & Meijboom, K. (2021). A qualitative exploration of the wood product supply chain – investigating the possibilities and desirability of an increased demand orientation. *Forest Policy and Economics*, *133*, 102606. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102606

Iv, J. L. C., Demchik, M. C., & Vokoun, M. M. (2018). Effects of Seasonal Timber Harvesting Restrictions on Procurement Practices. *Forest Products Journal*, *68*(1), 43–53. https://doi.org/10.13073/FPJ-D-16-00056

Johansson, M., Erlandsson, E., Kronholm, T., & Lindroos, O. (2021). Key drivers and obstacles for performance among forest harvesting service contractors – a qualitative case study from Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, *36*(7–8), 598–613. https://doi.org/10.1080/02827581.2021.1981431

Johansson, M., Erlandsson, E., Kronholm, T., & Lindroos, O. (2022). The need for flexibility in forest harvesting services – a case study on contractors' workflow variations. *International Journal of Forest Engineering*, *0*(0), 1–13. https://doi.org/10.1080/14942119.2022.2071142

Palander, T. (2022). Outsourcing Issues of Wood Supply Chain Management in the Forest Industry. *Forest Science*, *68*(5–6), 521–532. https://doi.org/10.1093/forsci/fxac029

Sarrazin, F., LeBel, L., & Lehoux, N. (2018). Identifying Key Factors for the Success of a Regional Logistic Center. *Forest Science*, *64*(3), 233–245. https://doi.org/10.1093/forsci/fxy001

Simard, V., Rönnqvist, M., LeBel, L., & Lehoux, N. (2024). Improving the decision-making process by considering supply uncertainty – a case study in the forest value chain. *International Journal of Production Research*, *62*(3), 665–684. https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2169382

Trzcianowska, M., Beaudoin, D., & LeBel, L. (2021). *Approach of flexible log yard design using discrete event simulation*. 20th International Conference on Modelling and Applied Simulation 18th International Multidisciplinary Modeling & Simulation Multiconference. https://doi.org/10.46354/i3m.2021.mas.006

Vitale, I., Cóccola, M. E., & Dondo, R. G. (2024). Assessing the benefits of storage and transshipments yards in timber supply chains by a column generation + grasp approach. *Annals of Operations Research*, *332*(1), 373–403. https://doi.org/10.1007/s10479-023-05479-z

Wikner, J., Bäckstrand, J., Tiedemann, F., & Johansson, E. (2015). Leagility in a Triad with Multiple Decoupling Points. In S. Umeda, M. Nakano, H. Mizuyama, N. Hibino, D. Kiritsis, & G. von Cieminski (Eds.), *Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth* (pp. 113–120). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22756-6_14

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Impact de la digitalisation sur l'amélioration la performance du processus de stockage dans le secteur automobile au MAROC

FAYÇAL MIMOUNI[1], RABII EL GOMRI[2], DRISS SERROU[3], ISMAIL LAGRAT[4], DAVID TCHOFFA[5], ABDERRAHMAN EL MHAMEDI[6]

[1,3,4] Laboratory of Advanced Systems Engineering (ISA),
ENSA & EST, Ibn Tofail University,
Kenitra, Morocco
[1] MIMOUNIFAYCAL@GMAIL.COM
[3] d.serrou@gmail.com
[4]ISMAIL.LAGRAT@UIT.AC.MA

[2] ISTL
Institut Supérieur de Transport et de la Logistique.
Casablanca, Morocco
gomri.r@gmail.com

[5,6]QARTZ Laboratory,
IUT of Montreuil,
Paris 8 University Paris, France
[5]d.tchoffa@iut.univ-paris8.fr
[6]a.elmhamedi@iut.univ-paris8.fr

***Résumé* – Dans un marché international de plus en plus concurrentiel, la digitalisation est devenue l'un des leviers stratégiques nécessaire afin de survivre et d'évoluer dans un marché des plus en plus demandeur de digitalisation. L'adoption des technologies numériques permet d'optimiser les processus, d'améliorer l'expérience client et de renforcer la réactivité face aux évolutions du marché. Par ailleurs et en plus de son impact sur l'image de l'entreprise dans le marché, la digitalisation permet aussi l'amélioration de la performance des processus de stockage en optimisant la gestion des flux, en réduisant les erreurs et en augmentant l'efficacité opérationnelle. En effet, grâce aux technologies telles que les systèmes de gestion d'entrepôt (WMS), l'intelligence artificielle et l'Internet des objets (IoT), les entreprises peuvent maintenant suivre leurs stocks en temps réel ce qui leur permettra une meilleure traçabilité et une meilleure anticipation des besoins en approvisionnement. Ce travail a pour objectif est de montrer l'impact de la digitalisation sur l'amélioration de la performance des stockages**

***Keywords* – Digitalisation, stockage, WMS, Intelligence artificiel, performance , processus , logistique 4.0**

***Abstract* – In an increasingly competitive international market, digitalization has become one of the essential strategic tools to survive and evolve in a business environment that is increasingly demanding digital transformation. The adoption of digital technologies enables companies to optimize processes, enhance customer experience, and improve responsiveness to market changes. Moreover, beyond its impact on a company's market image, digitalization also enhances the performance of storage processes by optimizing flow management, reducing errors, and increasing operational efficiency. Indeed, with technologies such as Warehouse Management Systems (WMS), Artificial Intelligence (AI), and the Internet of Things (IoT), companies can now track their inventory in real-time, allowing for better traceability and improved anticipation of supply needs. The objective of this work is to highlight the impact of digitalization on improving storage performance.**

***Mots clés* - Digitalization, storage, WMS, artificial intelligence, performance, process, logistics 4.0**

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Set-based models for VRP and their automatic decomposition in Hexaly

JULIEN DARLAY

[1] Hexaly
251 Boulevard Pereire, 75017 Paris, France
jdarlay@hexaly.com

Résumé **– Hexaly est un solveur model & run qui combine techniques exactes et heuristiques. Un formalisme de modélisation ensembliste a été ajouté pour simplifier la modélisation de certains problèmes combinatoires comme les problèmes de tournées ou de packing. Dans un problème de tournées, des variables de listes peuvent être utilisées pour modéliser la séquence des visites effectuées par chaque camion. Ces décisions sont adaptées pour une résolution heuristique mais sont plus difficiles à intégrer dans une approche par programmation mathématique pour calculer des bornes. Une reformulation directe en modèle PLNE introduit un nombre quadratique de variables et des contraintes « big M » ce qui bloque le passage à l'échelle et produit des mauvaises bornes inférieures. Hexaly détecte automatiquement ces structures dans les modèles utilisateurs et les reformule comme des programmes mathématiques étendus pour calculer des bornes en parallèle d'une résolution par des techniques heuristiques. Ce modèle est ensuite résolu par les techniques de l'état de l'art en branch & cut & price. Cet exposé présente l'approche générale, les algorithmes utilisées par la résolution et des benchmarks sur des instances académiques de tournées de véhicules.**

Mots clés **- (5 au maximum) Tournées de véhicule, génération de colonnes, décomposition automatique**

Abstract **– Hexaly is a model-and-run solver that integrates heuristics and exact methods. A set-based modeling formalism was introduced to simplify the modeling of certain combinatorial problems like routing or packing problems. For instance, in a routing problem, list variables can be used to model the sequence of visits made by each truck. These decision variables are well suited for a heuristic search but are much more difficult to integrate into a mathematical programming approach to compute lower bounds. A direct reformulation in a MILP model introduces a quadratic number of binary decisions with several big M constraints leading to poor scalability and bounds. Hexaly automatically detects such structures in a user model and reformulates them in an extended MILP model to compute lower bounds in parallel with a heuristic search. This model is solved efficiently using state of the art branch-cut-and-price techniques from literature. This talk will present the general approach, the algorithms used for the resolution and some benchmarks on the classical CVRP and CVRPTW library.**

Keywords **– Vehicle routing, column generation, automatic model decomposition**

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Improving Operational Route Planning Through Shared Multi-Configuration Truck Fleets

SHAHIDI ASUDEH[1], RÖNNQVIST MIKAEL[1], LEHOUX NADIA[1]

[1] Département de génie mécanique et de génie industriel, Université Laval, Québec, Canada (CIRRELT), Pavillon Adrien-Pouliot, avenue de la Médecine, Université Laval, Québec (Québec), Canada, G1V 0A6, local 3515, Asudeh.Shahidi.1@ulaval.ca; Mikael.Ronnqvist@gmc.ulaval.ca; Nadia.Lehoux@gmc.ulaval.ca

***Résumé* – Malgré l'abondance mondiale de la biomasse, son transport reste coûteux, limitant son potentiel pour une production de bioénergie à grande échelle. Cette recherche vise à améliorer le transport de la biomasse en intégrant les secteurs forestier, agricole et des déchets solides municipaux, via une stratégie de partage de camions. Pour permettre un partage de la flotte de véhicules entre les trois secteurs, un nettoyage peut parfois être nécessaire lors du passage entre certains types de biomasse, ce qui entraîne des coûts supplémentaires. Cependant, une planification intégrée des camions sur plusieurs chaînes de valeur peut réduire significativement les coûts de transport et améliorer l'efficacité globale en permettant de trouver de meilleures séquences de chargements et en réduisant les distances parcourues à vide. Par exemple, un camion conteneur peut transporter à la fois des résidus agricoles, des déchets solides municipaux ou des copeaux de bois produits dans les zones forestières. En supposant que les itinéraires possibles pour chaque camion sont prédéfinis, nous utilisons un modèle de programmation linéaire en nombres entiers pour sélectionner les itinéraires optimaux pour la flotte de camions. Les résultats à l'aide d'un exemple numérique montrent une réduction des coûts de transport d'environ 19% grâce à la stratégie de partage. Une telle collaboration permet non seulement d'augmenter l'approvisionnement en biomasse, mais aussi d'atténuer la saisonnalité et de stabiliser la production de bioénergie. Cette recherche constitue donc une première étape pour démontrer les avantages potentiels de la stratégie de partage de camions lors du transport de la biomasse.**

***Abstract* – Despite an abundance of biomass, its transportation remains expensive, hindering its potential for large-scale bioenergy production. This research enhances operational feedstock transportation by integrating forest, agriculture, and municipal solid waste (MSW) sectors through a truck sharing strategy. When sharing the trucks among the three sectors, if possible, they may require cleaning when switching between specific biomass types, which cause additional costs. However, integrated truck planning over multiple value chains can significantly reduce transportation costs and improve the overall efficiency by finding better sequences of full truckloads and reducing empty driving distances. For example, a container truck may transport agriculture residues as well as MSW or wood chips from forest areas. Assuming that the possible routes for each truck is prespecified, we use an integer programming route-based model to select the optimal routes for the trucks fleet. The results from a numerical example show that the transportation time may be reduced by 19% through this strategy. Such collaboration not only increases the biomass supply, but also mitigates seasonality and stabilizes bioenergy production. This research therefore appears as an initial step to demonstrate the potential benefits of a trucks sharing strategy for biomass transportation.**

***Mots clés* - Transport de biomasse, Collaboration, Partage de véhicules, Nettoyage de véhicules, Tournées de véhicules.**
***Keywords* – Biomass transportation, Collaboration, Truck sharing, Trucks cleaning, Vehicle routing.**

1 INTRODUCTION

Collaboration has recently gained more attention in the literature due to its proven ability to enhance the efficiency of costly operations within value chains. Bioenergy production at biorefineries requires substantial volumes of waste and residue resources, which are typically transported in full truckloads. However, these feedstocks are spread across large geographical areas, often resulting in trucks traveling long distances empty before reloading. This inefficiency highlights the need for improved transportation strategies to optimize resource utilization and reduce costs.

This research focuses on collaborative transportation of biomass as transportation operations represent a significant share of the biomass value chain costs. In particular, it aims at improving feedstocks transportation at the operational level by integrating the transportation operations in three biomass sectors, namely forest, agriculture, and municipal solid waste (MSW). We integrate this broad scope, expecting it to lead to reductions in transportation costs as better planning can be achieved by considering larger regions and a larger fleet of trucks [Flisberg et al., 2009]. Our operational problem context contains a set of supply and demand nodes with various types of biomass and other products (all referred to as assortments) from the three sectors to be transported by a multi-configuration fleet of trucks. To improve the planning, trucks are shared among the sectors. When sharing the trucks, a truck type can transport a wider variety of assortments beyond those traditionally assigned to it. This means that instead of restricting each truck type to a specific subset of deliveries, trucks are allowed to transport between any pair of supply and demand nodes within the entire

network, as long as the truck and assortment types are compatible.

Besides its potential to reduce the overall transportation cost significantly, the truck sharing strategy has specific challenges from the practical point of view. In some cases, we need to configure the trucks according to the specific features of a biomass type. For example, when a container truck delivers forest residue chips from forest sites to biorefineries, then it needs to be cleaned before it is used for transportation from agriculture sites to food industry to maintain the quality of the raw material, such as grain. Another challenge from a modeling point of view is that the supply and demand requests are based on weight (tons) on a daily or a weekly basis, whereas the trucks deliver full truckloads based on a daily plan. As the capacity and the configuration of the shared trucks are heterogenous, we cannot define supply and demand requests based on the number of full truckloads before solving the problem.

While several studies evaluated the impact of collaboration on transportation costs in the forest sector at both operational and tactical planning levels, no study was performed to integrate it with other biomass sectors for the purpose of a more efficient biomass transportation. [Flisberg et al., 2015] achieved 22% cost savings through bartering at the tactical level for biomass transportation. Similarly, [Guajardo, 2018] developed a three-index vehicle routing problem (VRP) with bartering for log transportation and mentioned its applicability to the operational level for biomass transportation. Several researchers also studied backhauling to estimate the costs of forest products transportation at the tactical level. For example, [Abasian et al., 2017] proposed a 23% improvement in forest transportation costs by reducing empty driving distances and GHG emissions.

In this article, we propose a truck sharing strategy to enhance the efficiency of biomass transportation by integrating transport planning over three sectors: forest, agriculture, and MSW. This strategy is incorporated into a route-based optimization model that not only identifies better routes within each sector, but also determines more efficient sequences of full truckloads across the entire network. The problem is solved for a single planning period (one day), during which deliveries to demand nodes may slightly exceed the requested volumes, as all deliveries are made in full truckloads. The goal is to reduce empty driving distances and lower overall operational costs.

This works contributes to the field of biomass transportation by integrating three distinct bioenergy value chains. It also contributes to the field of horizontal collaborative transportation by examining the challenges of switching trucks between different assortment types. According to our findings, such challenge is common when the assortments differ in quality [Lahyani et al., 2015] and/or the trucks require reconfiguration, for example, the cleaning required to transport grain in a container truck that previously carried forest residue chips. A small-scale instance demonstrates that the savings achieved through this strategy exceed the additional costs it introduces to the system when exploited.

The remainder of this article is structured as follows. Section 2 reviews the related literature. Section 3 describes the problem and the methodology. Section 4 introduces the results. Finally, Section 5 concludes by summarizing the main findings and future research directions.

2 LITERATURE REVIEW

We first review the literature related to the collaboration in transportation and then discuss existing vehicle routing problems that have similarities to our study.

[Basso et al., 2019] reviewed the literature related to the horizontal collaboration in logistics. The authors mentioned that the main question to be answered in collaborative logistics is to find an agreement among the partners to be engaged in the cooperation. They concluded that trust and the coordination mechanism are the main obstacles that make collaboration challenging from a real-world point of view. Despite its challenges, horizontal collaboration has gained attention in transportation due to its potential to reduce the related costs significantly. Various studies used appropriate coordination mechanisms in different fields to make collaboration more likely to occur in practice.

[Basso et al., 2021] found that, due to antitrust concerns, the companies rarely agree to collaborate in reality. This was because previously it had been assumed that prices and quantities had been fixed and to make the collaboration profitable, grand coalition of all firms should had always emerged. To overcome this problem, they proposed a mixed integer linear programming collaboration model to allow the firms compete under a Cournot fashion after agreements among them were signed. In the proposed approach, the formation of one set of coalition affected prices and production of all other competitors. To analyze the coalition formation in different settings and to select the best partition among them, they proposed multiple models. Another collaboration case was studied by [Chen 2016], considering a carrier collaboration problem in less-than-truck load transportation. If exchangeable, multiple carriers exchanged their transportation orders (pickup and delivery requests). Each transportation request was associated with a pickup location with a time window, a delivery location with a time window, a quantity, and an amount of revenue. They modeled the problem as a set-partitioning problem using a mixed integer programming formulation, which was solved using combinatorial clock-proxy exchange containing two phases: clock exchange for price discovery designed based on Lagrangian Relaxation and an ascending proxy exchange for efficiency determined based on the information collected in each round of the clock phase. [Pérez-Bernabeu et al., 2015] compared the collaborative and non-collaborative road transportation in terms of savings in distance-based and environmental costs. They assumed that the shipper companies owned the vehicles used for transportation, and a scenario of full horizontal collaboration, where each customer is delivered by the closest provider, is compared to the result of the non-collaborative cases, where each provider delivers its own customers. In the former, the resources and information all are shared to reduce the transportation costs. The latter includes the best non-cooperation, in which the customers are close to their depots, and the worst non-cooperation, in which the customers are not all close to their depots. The non-collaborative scenarios were solved using a well-known algorithm for Capacitated Vehicle Routing Problem, and the collaborative one was solved using a proposed Iterated Local Search algorithm, which gave high-quality solutions. Depending on the geographical distribution of customers, the reduction ranged from 5% to 90% in both costs and greenhouse gas emissions, and consequently in delivery times implying better customer services. [Flisberg et al., 2015] analyzed a country-wide analyze of forest fuel transportation and concluded that what makes forest fuel a competitive bioenergy source is an efficient logistic, which, the authors say, is possible

through a better collaboration among the companies transporting them. They used linear programming optimization models to solve different collaborative scenarios, which resulted in about 22% savings. They also applied game theory concepts to spread the savings among the collaborators to ensure their continuous collaboration.

In biomass transportation, the integration of multiple sectors is particularly important as biomass is typically transported in full truckloads from supply to demand nodes, with trucks traveling loaded in the forward direction and unloaded on the return [Frisk et al., 2010]. Although the existing studies primarily focus on a single biomass sector, a few studies on the operational biomass transportation problem have similarities to our approach. [Malladi et al., 2018] proposed a decomposition-based approach to solve short-term logistics for forestry biomass, while also accounting for different truck and biomass type compatibilities. [Han et Murphy, 2004] developed a route-based optimization model for a woody biomass transportation problem, while using a simulated annealing algorithm to generate feasible routes for each truck type. Neither of the two approaches mentioned above can be applied directly to our problem for two main reasons. First, the integrated route planning across three biomass sectors is not considered in either study. Second, their model only permits the use of trucks that are inherently compatible with a given assortment. In contrast, our approach allows for the use of both compatible and non-compatible trucks—not only within the corresponding sector but also across different sectors—by incorporating cleaning operations when necessary.

Although horizontal collaborative transportation with consideration of cleaning operations has been addressed in similar industries, certain limitations prevent these approaches from being directly applicable to integrated biomass supply chains. [Lahyani et al., 2015] solved a multi-compartment vehicle routing problem requiring compartment cleaning activity in the collection of olive oil in Tunisia as olive oil usually comes in different qualities and they must be kept separate during transportation. They analyzed the potential savings in routing achieved by replacing single-compartment vehicles with multi-compartment ones, and they assumed that the compartments can be used for transportation of all oil qualities, while they need to be cleaned if a lower quality product is loaded into it before a higher quality one. A cost is generated if a cleaning procedure is undertaken. In this study, each compartment is assigned to a specific assortment in each period and it undergoes cleaning activity once at the beginning of each period if needed. While in our study, the trucks are cleaned at the beginning of any transportation order in any period if its previous transportation order contaminated the truck and the current transportation order needs to be kept clean. Configuring the trucks according to the assortment types is required in particular cases similar to our study to make collaboration more likely in practical and find better sequences of full truckloads in the entire network. In spite of its importance, to the best of our knowledge, no study in the literature of horizontal collaboration in vehicle routing problems incorporated such service time and cost in their models. In this research, we demonstrate the potential benefits of such collaboration.

3 Problem Description and Methodology

3.1 Problem description

Biomass transportation accounts for approximately one-third of the total logistics cost in the bioenergy value chain [Malladi et Sowlati, 2017], primarily due to the material's unfavorable characteristics, such as bulkiness, flowability, low energy density, and high moisture content. A particularly costly component of biomass transportation is the truck planning at the operational level. This is not only due to the intrinsic characteristics of biomass, but also because biomass is typically transported in full truckloads, leading to frequent empty return trips and underutilization of transportation capacity. The routing plan described in this article defines the sequence in which supply and demand nodes are visited by each truck and the types of assortment transported on each trip. Traditionally, truck routing is addressed as three separate vehicle routing problems, one for each biomass sector. In contrast, we propose a truck-sharing approach across the three sectors and formulate a single integrated vehicle routing problem for the entire network. Important is the fact that the three single VRPs typically are specialized for each type of material transported and hence there is a complex compatibility that makes the integrated problem more difficult. This integration results in cost savings and more efficient routing.

Figure 1 illustrates the routing schemes by comparing four typical independent routes on the left with four collaborative routes on the right. Each route is performed by one of the four different trucks: a wood chips truck in forest sector, an MSW truck in MSW sector, and two trucks in the agriculture sector—one transporting crop residues and the other transporting grain. Figure 1 (A) illustrates the non-collaborative scenario where each truck serves within its respective sector. Their routes are represented by different colors, with solid arrows indicating loaded trips and dashed arrows indicating unloaded trips. Figure 1 (B) shows the corresponding collaborative scenario where the same requests are satisfied while truck-sharing leads to fewer number of route crossings and shorter unloaded distances. As can be seen, the affected unloaded distances in this example, marked by 'a' and 'b', are reduced by about 30% through truck sharing.

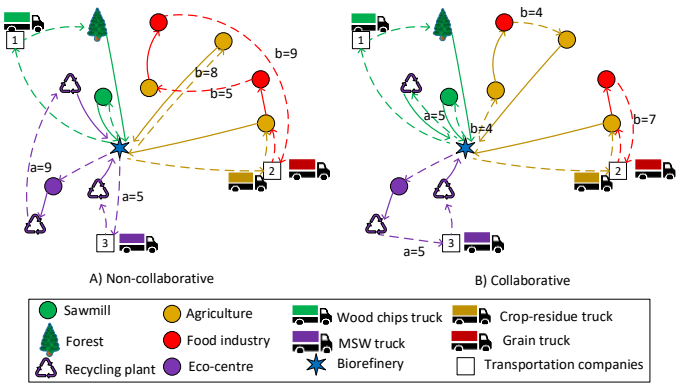


Figure 1: Reduction of empty distances shown by 'a' and 'b' through a truck sharing strategy.

In this example, two pair of the trucks collaborate. Firstly, in the non-collaborative routing for the grain truck from the transportation company 2, one of the nodes is located far from the other nodes but close to the nodes served by the crop-residue truck from the same transportation company. In this case, the crop-residue truck can serve that distant node on behalf of the grain truck, reducing the corresponding unloaded trips indicated by the letter 'b' in both figures. Secondly, collaboration among the MSW truck from the transportation company 3 and the wood chips truck from the transportation company 1 leads to the

reduction of unloaded distances marked by the letter 'a'. Another benefit of this strategy is the ability to transport larger volumes per trip, as the truck with higher capacities can be used instead of low-capacity, dedicated ones.

Not visible on this figure is the additional service time and cost added when sharing the trucks. In this example, these arise when the crop-residue truck collaborates with the grain truck to deliver grain from the agriculture site to the food industry after completing its dedicated delivery of crop residue from another agriculture site to the biorefinery. This is because the crop-residue truck needs to be cleaned before loading grain. These costs will be included in the objective function of our route-based optimization model proposed in the following section.

3.2 Methodology and Mathematical modeling

We assume that the possible routes for each truck are prespecified, representing the sequence in which the nodes are visited, types of assortment transported, and the additional cost for cleaning the truck wherever needed. It is obvious that the prespecified routes must respect the routing constraints, such as the maximum travel time limit, the truck capacity, the truck type and the assortment type compatibility, multiple visits to the nodes, and an unloaded trip following each loaded trip. Table 1 shows two examples of such routes for the crop-residue truck, which are also illustrated in Figure 1. Table 1 shows the information that are available for the generated routes. These include the origin and destination of the truck, sequence in which the nodes are visited, the information about the loads of the truck in each trip, cleaning the truck when switching between specific assortments, a full-truckload of an assortment transported on each loaded trip, and the total travel time which includes times for transportation, loading, unloading, and cleaning activities.

Table 1. Examples of pre-generated routes for the crop-residue truck in Figure 1.

Scenarios	Example of routes
Non-collaborative route:	TC2 $\underbrace{\longrightarrow}_{empty}$ AS $\underbrace{\longrightarrow}_{crop\ residue}$ B $\underbrace{\longrightarrow}_{empty}$ AS $\underbrace{\longrightarrow}_{crop\ residue}$ B $\underbrace{\longrightarrow}_{empty}$ TC2
Total time of the non-collaborative route:	Times for Empty driving + Loading + Loaded driving + Unloading + Empty driving + Loading + Loaded driving + Unloading + Empty driving.
Collaborative route:	TC2 $\underbrace{\longrightarrow}_{empty}$ AS $\underbrace{\longrightarrow}_{crop\ residue}$ B $\underbrace{\longrightarrow}_{empty}$ $\underbrace{\longrightarrow}_{cleaning}$ AS $\underbrace{\longrightarrow}_{grain}$ FI $\underbrace{\longrightarrow}_{empty}$ AS $\underbrace{\longrightarrow}_{crop\ residue}$ B $\underbrace{\longrightarrow}_{empty}$ TC2
Total time of the collaborative route:	Times for Empty driving + Loading + Loaded driving + Unloading + Empty driving + Cleaning + Loading + Loaded driving + Unloading + Empty driving + Loading + Loaded driving + Unloading + Empty driving.

TC2: transportation company 2; AS: agriculture site; FI: food industry; B: biorefinery.

For such a context, we propose and solve a route-based optimization model based on integer programming formulation to select an optimal route for each truck while minimizing routing costs and respecting the supply, demand, and route selection constraints. This model is an initial step to solve both the collaborative and non-collaborative scenarios to show the potential saving yielded by trucks sharing. Table 2 represents the notations used to formulate the optimization model.

Table 2: Notation of the optimization model.

Sets	**Definitions**
I	Set of supply nodes each corresponding to one assortment; $i \in I$.
J	Set of demand nodes each corresponding to one assortment: $j \in J$.
K	Set of all trucks: $k \in K$.
R_k	Set of all feasible routes for truck k; r $\in R_k$.
Parameters	**Definitions**
c_r	Total cost of route $r \in R_k$, i.e. costs of transportation, loading, unloading, and cleaning.
s_i	Supply availability at supply node i∈ I.
d_j	Demand request at demand node j∈ J.
a_{ir}	The quantity picked up at supply node $i \in I$ by route $r \in R_k$.
b_{jr}	The quantity delivered to demand node $j \in J$ by route $r \in R_k$.
Decision variables	**Definitions**
x_r	Equals 1 if route r∈R_k is selected, and 0 otherwise.

The route-based optimization model (1)-(5) is formulated based on the concepts a general mixed integer programming model where the variables represent complete routes, and where each truck can choose at most one route.

$$Min\ Z = \sum_{k\in K}\sum_{r\in R_k} c_r . x_r \qquad (1)$$

$$\sum_{k\in K}\sum_{r\in R_k} a_{ir} . x_r \le s_i \qquad \forall\, i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{k\in K}\sum_{r\in R_k} b_{jr} . x_r \ge d_j \qquad \forall\, j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{r\in R_k} x_r \le 1 \qquad \forall k \in K \quad (4)$$

$$x_r \in \{0,1\} \qquad \forall r \in R_k, k \in K \quad (5)$$

Objective function (1) minimizes the total routing costs, which include the transportation cost between the nodes, loading and unloading costs, and cleaning costs. Constraints (2) ensure that the quantity picked up at each supply node does not exceed its available volume. Constraints (3) guarantee that the total quantity delivered to each demand node satisfies the requested demand volume. Constraints (4) choose at most one route for each truck. Finally, the domains of the variables are defined in constraints (5). These quantities can be integer multiplications of the capacity of the used truck on route r, as a node may be visited multiple times by a truck to serve its multiple full truckload requests. There are route models proposed earlier that are close to set-covering or set-partitioning model. However, as the load for different truck is different, we need to use a more general model.

4 RESULTS

A small-scale instance was generated to show the potential savings in daily transportation of biomass if we supply a biorefinery with three main resources of biomass from forest, agriculture, and MSW sectors and integrate their transportation planning using a truck sharing strategy. As shown in Figure 2, we consider a small set of supply and demand nodes from the

three sectors in the province of Quebec, Canada, with a biorefinery as one of the demand nodes, requesting various types of waste feedstocks. The small instance encompasses a total of 10 different supply and demand nodes in the three sectors and seven different assortment types, including chips, forest residue chips, crop residues, grain, waste wood, waste wood chips, and recyclable materials. The green nodes represent the supply sites, while the white nodes show the demand locations. In some locations, the supply and demand nodes overlap because the same location may be represented more than once, for demand and for supply requests of different assortments. One red node in the middle of the network shows a single depot, where all the trucks start and end their routes.

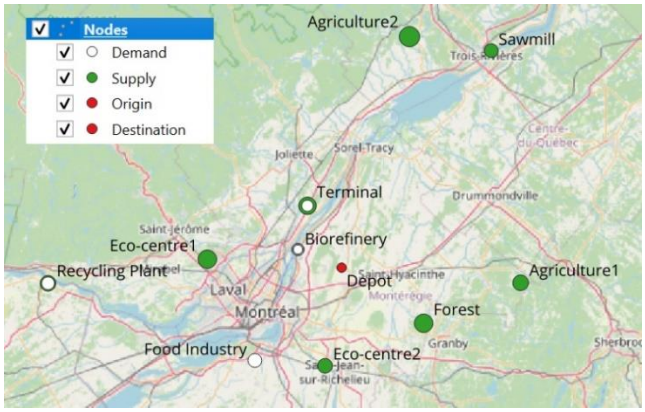


Figure 1: A small network of supply and demand nodes from forest, agriculture, and MSW sectors in Quebec. Canada.

The total volume to be delivered in this example is assumed to be 600 tons, which is equivalent to 20 full truckloads if each sector work separately. Table 3 represents the available trucks and their assumed capacities. Each truck is assumed with 9 hours of maximum travel time limit.

Table 3: Assumptions about trucks fleet.

Truck types	**Availability**	**Capacity**
Wood Chips Truck	3	45 tons
Grain Truck	4	35 tons
Crop Residue Truck	4	35 tons
MSW Truck	5	30 tons

In the non-collaborative scenario, we assume that a wood chips truck is dedicated to the forest sector, for transporting chips and forest residue chips. The grain truck and crop residue truck are assigned to agriculture sector for delivering grain and crop residues, respectively. The MSW truck is designated to the MSW sector for transporting waste wood, waste wood chips, and recyclable materials. In contrast, in the collaborative scenario, all trucks are permitted to transport any assortment, on condition that cleaning operations are performed before transporting chips and grain when the truck switches from any assortment to these assortments.

To solve this problem, the possible routes for each truck are enumerated using graph traversal. It is worth noting that this process becomes computationally challenging for larger instances. To manage this complexity, the network connections are limited to the links that are most likely to be used for deliveries. The preprocessing is done by solving a classical transportation problem where the flows indicate the likely connections. As this problem is solved for bit loaded and empty transport, we can generate the connections out from both supply and demand nodes. This reduction in connectivity significantly decreases the number of possible routes that need to be enumerated. The approach used to identify the connectivity is based on classic transportation problem using both loaded and empty transports/flows. After prespecifying all possible routes for both collaborative and non-collaborative scenarios, we consider one planning period and select the optimal routes for each scenario using the optimization model (1)-(5) implemented in Python 3.9.13 and solved using Gurobi Optimizer 11.0.3 on Intel(R) Core (TM) i7-4600U CPU @ 2.10GHz with 8 GB of installed RAM. Figure 3 and Table 4 show the results for the non-collaborative scenario, where the routes are planned for each sector separately.

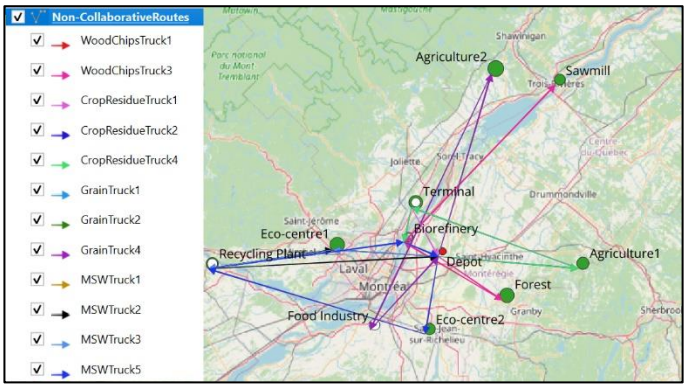


Figure 3: Optimal routes in the non-collaborative scenario.

Table 4: Routing results in the non-collaborative scenario.

	Results
Number of WoodChips trucks used	2
Number of Grain trucks used	3
Number of CropResidue trucks used	3
Number of MSW trucks used	4
Total travel time	78.54 hours
Execution time of route selection	2 second

Table 5 and Figure 4 represent the results for the collaborative scenario, where one integrated routing problem is solved for the whole network.

Table 5: Routing results in the collaborative scenario.

	Results
Number of WoodChips trucks used	3
Number of Grain trucks used	4
Number of CropResidue trucks used	2
Number of MSW trucks used	0
Total travel time	63.5 hours
Execution time of route selection	3 seconds

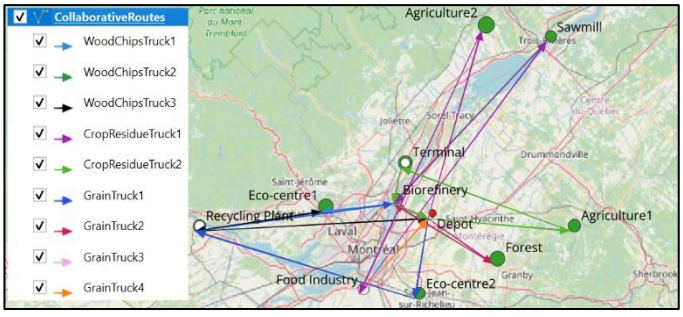


Figure 4: Optimal routes in the collaborative scenario.

Figures 3 and 4 are extracted from QGIS. As some of the routes overlap each other, all the routes are not clearly visible in the two figures. The total transportation time is reduced from 78.54 hours to 63.5 hours when different sectors collaborate. This shows that, despite the additional service time due to cleaning operations, the benefits of truck sharing outweigh its disadvantages. The total number of trucks required for transportation is also reduced by 3 trucks. Comparing the two scenarios, we also observe that when sharing the trucks, the wood chips truck, grain truck, and crop residue truck with higher capacities, 45, 35, and 35 tons respectively, are preferred over MSW truck with lower capacity, 30. As a result, the total number of full truckload deliveries is reduced from 20 to 17. Notably, in both scenarios, the total demand volume of 600 tons is fully met, requiring 20 full truckload deliveries in the non-collaborative scenario and only 17 in the collaborative scenario, demonstrating the efficiency gains from collaboration.

We demonstrate the potential benefits of a truck-sharing strategy by solving a small instance using optimization tools. The results highlight potential gains achievable through this approach. However, it is important to note that the savings are dependent on various assumptions that are made when generating the data. These include truck cleaning time, the compatibility of assortments with different truck types, truck travel time limits, and the locations of supply and demand nodes. For future research, we plan to explore additional scenarios over multiple planning periods to further validate and expand our findings.

5 Conclusion

Regarding the high cost of transportation operations and the pressing need to optimize and improve biomass transportation for large-scale bioenergy production, we propose a methodology based on a truck-sharing strategy to integrate transportation of waste and residues sourced from forest, agriculture, and MSW. Using a route-based optimization model, we select optimal routes for a fleet of trucks for two different scenarios: first, for a non-collaborative scenario where the trucks of each sector are planned separately, and second, for a collaborative scenario where the trucks are shared among the three sectors. When sharing the trucks, additional service time and cost are required to clean the trucks if the trucks switch between specific assortment types.

We apply this approach to a small-scale generated instance in Quebec, Canada, where an operational transportation problem is addressed to deliver various low-quality biomass residues to a biorefinery and to transport other assortments to other demand nodes in the three sectors. We observed that, despite the additional service time and cost due to cleaning activities, the total transportation time in the collaborative planning is reduced by about 19%. This is because better sequences of full truckload deliveries are found, leading to shorter empty running of trucks. Therefore, multiple sectors integration through truck sharing offers key advantages over its non-collaborative counterpart. These include reducing empty driving distances, increasing biomass supply by enabling the use of higher-capacity trucks, and mitigating seasonality, which helps stabilize the bioenergy production. Nevertheless, the amount of savings depends on assumptions such as the truck cleaning time, the assortment compatibility, the travel time limits, and node locations within the network.

A potential future research direction could involve evaluating the savings when the proposed approach is applied to real-world cases with larger networks and fleets of trucks. Another important avenue is evaluating the efficiency of the plan in terms of the three dimensions of sustainability (economic, environmental, and social). Moreover, developing an allocation method to allocate the savings gained from collaboration (truck sharing) among the involved collaborators would make the inter-firm collaboration long-lasting. Finally, the exponential complexity of route generation in large-scale problems remains a key limitation, which could be addressed in future work using advanced techniques such as column generation.

Our methodology can also be applied to similar industries where goods are transported in full truckloads, such as the oil industry. An important consideration is the potential for truck sharing among different value chains with similar products. In such cases, the truck configuration must be compatible with the goods from other value chains to allow for truck sharing and reduce empty driving distances, while also accounting for any additional requirements such as product handling protocols.

6 Acknowledgment

The work presented in this paper was carried out as part of an EU project, “FlexSNG” that has received funding from the European Union’s Horizon 2020 Research and Innovation Programme under Grant Agreement No 101022432 and the Government of Canada’s New Frontiers in Research Fund (NFRF) and the Fonds de recherche du Québec (FRQ).

7 References

Abasian, F., Rönnqvist, M., & Ouhimmou, M. (2017). Forest fibre network design with multiple assortments: a case study in Newfoundland. *Canadian Journal of Forest Research*, 47, 1232–1243.

Basso, F., Basso, L.J., Rönnqvist, M., & Weintraub, A. (2021). Coalition formation in collaborative production and transportation with competing firms. *European Journal of Operational Research*, 289, 569–581.

Basso, F., D’Amours, S., Rönnqvist, M., & Weintraub, A. (2019). A survey on obstacles and difficulties of practical implementation of horizontal collaboration in logistics. *International Transactions in Operational Research*, 26, 775–793.

Chen, H. (2016). Combinatorial clock-proxy exchange for carrier collaboration in less than truck load transportation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 91, 152–172

FlexSNG, (2020). Flexible Production of Synthetic Natural Gas. https://www.flexsng.eu/.

Flisberg, P., Frisk, M., Rönnqvist, M., & Guajardo, M. (2015). Potential savings and cost allocations for forest fuel transportation in Sweden: A country-wide study. *Energy*, 85, 353–365.

Flisberg, P., Liden, B., & Rönnqvist, M. (2009). A hybrid method based on linear programming and Tabu search for routing of logging trucks. *Computers & Operations Research*. 36, 1122–1144.

Frisk, M., Göthe-Lundgren, M., Jörnsten, K., & Rönnqvist, M. (2010). Cost allocation in collaborative forest transportation. *European Journal of Operational Research*, 205, 448–458.

Guajardo, M. (2018). Environmental benefits of collaboration and allocation of emissions in road freight transportation.

Sustainable freight transport: theory, models, and case studies, 79–98.

Han, S.K., & Murphy, G.E. (2012). Solving a woody biomass truck scheduling problem for a transport company in western Oregon, USA. *Biomass and bioenergy*, 44, 47–55.

Lahyani, R., Coelho, L.C., Khemakhem, M., Laporte, G., & Semet, F. (2015). A multi-compartment vehicle routing problem arising in the collection of olive oil in Tunisia. *Omega*, 51, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.08.007.

Pérez-Bernabeu, E., Juan, A.A., Faulin, J., & Barrios, B.B. (2015). Horizontal cooperation in road transportation: a case illustrating savings in distances and greenhouse gas emissions. *International Transactions in Operational Research*, 22, 585–606.

Malladi, K.T., Quirion-Blais, O., & Sowlati, T. (2018). Development of a decision support tool for optimizing the short-term logistics of forest-based biomass. *Applied energy*, 216, 662–677.

Malladi, K.T., & Sowlati, T. (2017). Optimization of operational level transportation planning in forestry: a review. International Journal of Forest Engineering. 28, 198–210. https://doi.org/10.1080/14942119.2017.1362825

Malladi, K.T., & Sowlati, T. (2018). Biomass logistics: A review of important features, optimization modeling and the new trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 587–599.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Gestion durable des entrepôts grâce aux jumeaux numériques

ADNANE DRISSI ELBOUZIDI [1], FREDERIC ROSIN [2], SAMIR LAMOURI [1], ROBERT PELLERIN [3]

[1] LAMIH, ARTS ET METIERS PARISTECH
151 Bd de l'Hôpital, 75013 Paris, France
{adnane.drissi_elbouzidi ; samir.lamouri}@ensam.eu

[2] LAMIH, ARTS ET METIERS PARISTECH
2 Cr des Arts et Métiers, 13617 Aix-en-Provence, France
frederic.rosin@ensam.eu

[3] CIRRELT, IVADO, Polytechnique Montréal
500 chemin de Polytechnique, Montréal, Canada
robert.pellerin@polymtl.ca

***Résumé* – Cet article examine l'intégration de la comptabilité carbone dans la technologie des jumeaux numériques (JN), proposant une approche dynamique et granulaire pour surveiller et optimiser les impacts environnementaux des opérations d'entrepôt. Les méthodes traditionnelles de comptabilité carbone, comme le Bilan Carbone®, reposent souvent sur des données statiques et agrégées, limitant leur efficacité pour la prise de décision en temps réel et opérationnelle. En intégrant la comptabilité carbone aux JN, cette recherche permet un suivi précis des émissions liées aux processus spécifiques de l'entrepôt, notamment la consommation énergétique, la manutention des matériaux et les déplacements des employés. Une analyse comparative met en évidence la capacité des JN à relever les défis opérationnels tout en complétant les perspectives stratégiques plus larges offertes par les méthodes conventionnelles. Les premières simulations identifient les principaux contributeurs aux émissions, tels que les déplacements domicile-travail et l'utilisation accrue de plastiques pendant les périodes de forte activité, démontrant ainsi le potentiel des JN pour promouvoir des actions ciblées en faveur de la durabilité. Malgré des défis tels que la dépendance aux données et les coûts d'implémentation, la technologie des JN offre des informations en temps réel, spécifiques aux ressources, qui font progresser de manière significative les pratiques d'entreposage durable. Cette étude plaide pour l'intégration des JN avec des cadres de référence complets comme le Bilan Carbone®, afin de combler les lacunes entre la gestion environnementale opérationnelle et stratégique, et ainsi promouvoir une prise de décision globale et éclairée.**

***Abstract* – This paper investigates the integration of carbon accounting into Digital Twin (DT) technology, providing a dynamic and granular approach to monitoring and optimizing environmental impacts in warehouse operations. Traditional carbon accounting methods, such as Bilan Carbone®, often rely on static, aggregated data, limiting their effectiveness for real-time decision-making and operational improvements. By embedding carbon accounting within JNs, this research enables precise tracking of emissions across specific warehouse processes, including energy consumption, material handling, and employee commuting. Comparative analysis highlights the JN's ability to address operational-level challenges, complementing the broader strategic insights offered by conventional methods. Initial simulations reveal key emission contributors, such as commuting and plastic usage during peak seasons, demonstrating JNs' potential to drive targeted sustainability actions. Despite challenges like data dependency and implementation costs, JN technology offers real-time, resource-specific insights that significantly advance sustainable warehousing practices. This study advocates for integrating JNs with comprehensive frameworks like Bilan Carbone® to bridge operational and strategic environmental management, fostering holistic and informed decision-making.**

***Mots clés* – environnement, entrepôt durable, jumeau numérique, comptabilité carbone.**
***Keywords* – environment, sustainable warehousing, digital twin, carbon accounting.**

1 INTRODUCTION

L'importance croissante accordée à la durabilité à l'échelle mondiale s'est naturellement étendue aux opérations de la chaîne d'approvisionnement, y compris l'entreposage, qui est désormais un contributeur majeur aux émissions de gaz à effet de serre (GES) (Mazareanu, 2021 ; Minashkina, 2024). La croissance rapide du commerce électronique et l'expansion des entrepôts pour répondre aux demandes des clients ont amplifié leur impact environnemental (Ibrahim et al., 2024 ; Kumar & Adil, 2024). Aujourd'hui, les entrepôts ne sont plus de simples bâtiments de stockage, mais des centres logistiques multifonctionnels qui intègrent des activités à valeur ajoutée

telles que l'assemblage et la personnalisation, renforçant ainsi leur importance en matière de durabilité (Baglio et al., 2019 ; Baker, 2004). Cette évolution du rôle des entrepôts s'accompagne d'une augmentation de la consommation d'énergie, des émissions de GES et de l'utilisation des ressources, ce qui souligne la nécessité d'adopter des pratiques plus durables (Bartolini et al., 2019 ; Ries et al., 2016). Des estimations récentes indiquent que les bâtiments logistiques, y compris les entrepôts, représentent environ 17 % des émissions totales de GES aux États-Unis (Minashkina, 2024). Malgré cette prise de conscience croissante, la durabilité de l'entreposage demeure un domaine encore peu exploré tant dans la recherche académique que dans l'industrie (Beltrami et al., 2021 ; Torabizadeh et al., 2019). Les initiatives actuelles mettent souvent l'accent sur l'impact du transport tout en négligeant les défis spécifiques des opérations d'entreposage, notamment l'utilisation intensive d'énergie et de ressources pour la manutention, l'éclairage, le chauffage, la ventilation et la climatisation (Jakšič & Budler, 2020). De plus, les certifications environnementales existantes, telles que LEED et BREEAM, ou les méthodes de calcul de GES comme le protocole GES ou l'ISO14064, manquent souvent de précision pour mesurer les impacts opérationnels spécifiques, laissant des lacunes dans les métriques de durabilité, le suivi et les directives exploitables (Perotti & Colicchia, 2023 ; Shaw et al., 2020).

Les avancées de l'Industrie 4.0, en particulier grâce à l'intégration de systèmes cyber-physiques tels que les JN, ouvrent de nouvelles perspectives pour un entreposage durable (Drissi Elbouzidi et al., 2023). La technologie des JN permet de créer des répliques virtuelles en temps réel des environnements physiques d'entrepôt, offrant un suivi précis, la possibilité de lancer des scénarisons de simulation et d'optimisation de l'utilisation des ressources et des émissions dans des processus fonctionnels comme le tri des produits, la préparation de commandes et le stockage (Drissi Elbouzidi et al., 2023 ; Perotti & Colicchia, 2023). Cette approche s'aligne sur les principes de l'Industrie 5.0, qui met l'accent sur la durabilité et les processus centrés sur l'humain, contribuant ainsi à la fois aux objectifs environnementaux et au bien-être des travailleurs (Martini et al., 2024). En intégrant les JN aux systèmes de gestion d'entrepôt (Warehouse Management Systems - WMS), il devient possible de générer des analyses et conclusions exploitables, alliant l'efficacité opérationnelle de l'Industrie 4.0 aux impératifs éthiques de l'Industrie 5.0. Grâce aux analyses prédictives, au suivi en temps réel et à la modélisation de scénarios, les JN optimisent les opérations d'entrepôt et facilitent la production de rapports de durabilité, garantissant une meilleure conformité aux objectifs environnementaux.

Cette étude propose une méthodologie visant à améliorer le calcul des émissions de GES dans les entrepôts grâce à l'intégration des JN, comblant ainsi les lacunes des approches traditionnelles qui reposent principalement sur des indicateurs statiques et imprécis. En exploitant le potentiel des JN, l'objectif est de fournir un cadre complet permettant un suivi en temps réel des émissions et une évaluation rigoureuse de la performance en matière de durabilité des opérations d'entreposage. La suite de cet article est organisée comme suit : la Section 2 examine les problématiques existantes en matière d'entreposage durable et de calcul GES ; la Section 3 présente le modèle de recherche proposé ; la Section 4 expose les résultats expérimentaux et leurs implications ; enfin, la Section 5 conclut en soulignant les limites de l'étude et en suggérant des orientations pour les recherches futures.

2 REVUE DE LA LITTERATURE

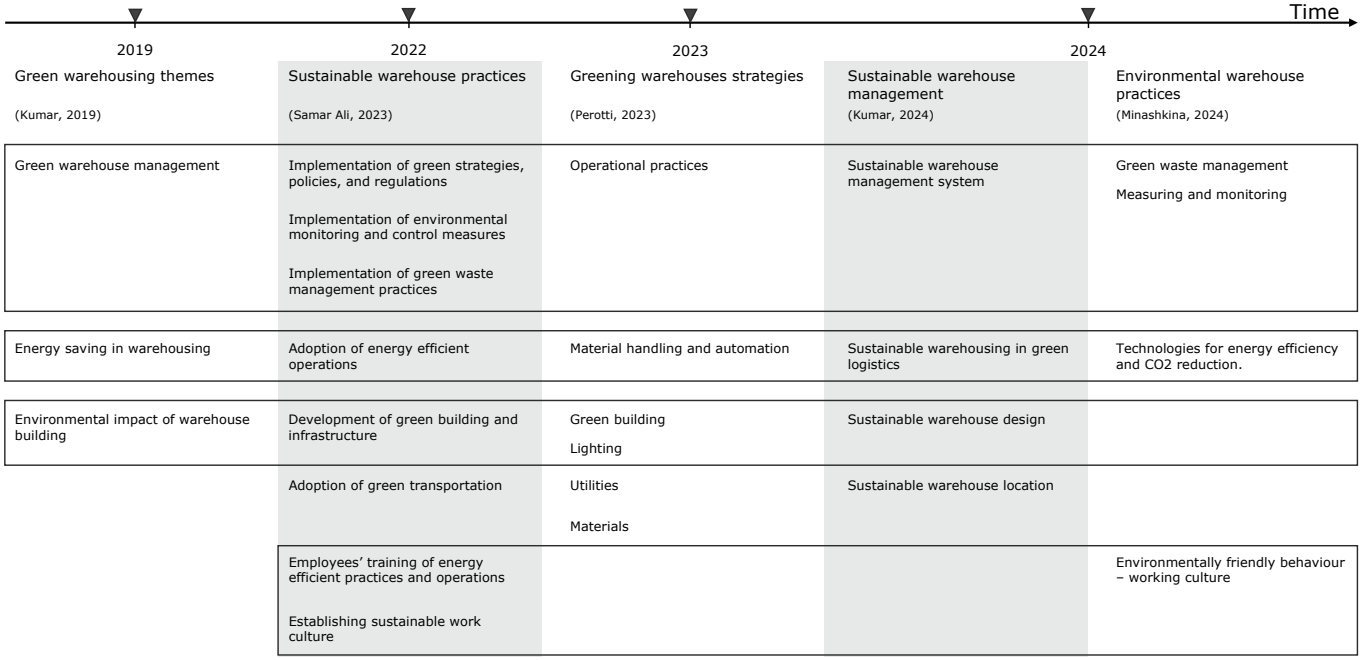
Cette revue de la littérature adopte une double approche : d'une part, elle explore l'état de l'art en matière de recherche sur l'entreposage vert, en mettant particulièrement l'accent sur la gestion durable des entrepôts (*Sustainable Warehouse Management - SWM*). D'autre part, elle identifie et évalue les outils de comptabilité carbone, positionnant ainsi les Jumeaux Numériques comme une technologie clé pour la gestion et le suivi des entrepôts écologiques.

2.1 L'entreposage vert

Un entrepôt est une infrastructure logistique où les marchandises et les matériaux sont stockés, gérés et distribués. Il sert de point central pour la réception, l'entreposage, la gestion des stocks, la préparation des commandes, l'emballage et l'expédition des produits (Bank & Murphy, 2013). Les entrepôts peuvent être à forte intensité de main-d'œuvre ou automatisés grâce à des robots et des systèmes de stockage et de récupération automatisés (*Automated Storage and Retrieval Systems - AS/RS*).

Cependant, la recherche sur l'entreposage durable reste fragmentée et accorde peu d'attention aux dimensions environnementales et sociales (Minashkina, 2024). Cette montée d'intérêt a entraîné une prolifération d'études examinant la durabilité dans l'entreposage, notamment dans le cadre plus large de la gestion durable des chaînes d'approvisionnement (*Sustainable Supply Chain Management*), comme illustré dans la Figure 1. Ces recherches identifient plusieurs grandes thématiques de l'entreposage vert, regroupées en macro-thèmes : Gestion durable des entrepôts, Économie d'énergie dans les entrepôts et Impact environnemental des bâtiments logistiques (Environmental impact of warehouse buildings) (Bartolini et al., 2019). Ces catégories ont été enrichies par Ali et al. (2023) et Minashkina (2024), qui ont introduit un quatrième macro-thème : la culture de travail verte *(green work culture),* soulignant l'importance de former et de sensibiliser le personnel à des pratiques respectueuses de l'environnement. D'autres sujets clés ont émergé, notamment la sélection durable de l'emplacement des entrepôts (Kumar & Adil, 2024) et le transport vert (Ali et al., 2023). Enfin, Perotti & Colicchia (2023) insistent sur l'importance des énergies alternatives ainsi que de l'utilisation, du réemploi et du recyclage des matières, des aspects qui nécessitent une recherche approfondie.

Figure 1. Classification des thèmes d'entreposage durable



L'approche de l'entreposage vert a progressivement évolué : initialement centrée sur l'optimisation de l'efficacité énergétique, la gestion des équipements de manutention et l'éclairage des entrepôts (Bartolini et al., 2019 ; Minashkina, 2024 ; Ries et al., 2016), elle tend désormais vers des systèmes de gestion intégrée, prenant en compte tous les indicateurs de durabilité pertinents (Ali et al., 2023 ; Bartolini et al., 2019 ; Kumar & Adil, 2024). Néanmoins, la recherche existante repose encore souvent sur des modèles conceptuels sans résultats concrets et exploitables (Bartolini et al., 2019). La gestion des entrepôts verts a connu des évolutions notables dans la littérature. Initialement axée sur la réduction de la consommation énergétique et l'empreinte carbone (Bartolini et al., 2019), elle s'oriente aujourd'hui vers des systèmes de gestion intégrés, capables d'assurer un suivi exhaustif des indicateurs environnementaux (Kumar & Adil, 2024). En effet, évaluer les impacts environnementaux de manière isolée est une approche réductrice qui ne tient pas compte de l'interconnexion des différents facteurs. Se concentrer uniquement sur les émissions de GES donne une vision incomplète si l'on ne prend pas en compte la génération de déchets, la consommation d'énergie et l'utilisation des matières premières – autant d'éléments contribuant indirectement à l'empreinte carbone des entrepôts, de la production à la fin de vie (Green Logistics, 2010).

2.2 Méthodes et outils de comptabilité du carbone

La gestion durable des entrepôts fait face à d'importants défis en raison de l'absence de métriques normalisées et de cadres de mesure complets (Rüdiger, 2016). De nombreuses études échouent à intégrer de manière cohérente les trois piliers de la durabilité (environnemental, social et économique), ce qui limite leur applicabilité (Ahmad et al., 2018). Le développement des systèmes de gestion durable des entrepôts *(Sustainable Warehouse Management Systems - SWMS)* est entravé par la complexité des multiples facteurs de durabilité à prendre en compte (Torabizadeh et al., 2019).

Les systèmes de gestion des entrepôts (*Warehouse Management Systems - WMS)* sont couramment utilisés pour améliorer l'efficacité opérationnelle et la gestion des stocks, mais leur potentiel en matière de durabilité reste sous-exploité (Happonen & Minashkina, 2021). En effet, des fonctionnalités avancées, telles que le suivi de la consommation d'énergie, la gestion des déchets et l'évaluation des émissions de carbone, sont encore largement absentes. Si un WMS peut optimiser certains processus comme la manutention et la planification des itinéraires pour réduire la consommation d'énergie, il manque aujourd'hui de véritables stratégies intégrées pour atteindre des objectifs de durabilité (Happonen & Minashkina, 2021 ; Torabizadeh et al., 2019). De plus, l'intégration de technologies telles que l'IoT et les systèmes cyber-physiques dans les WMS montre un potentiel prometteur, mais elle est souvent freinée par des coûts prohibitifs, des systèmes obsolètes et un manque d'interopérabilité (Minashkina, 2024).

La comptabilité carbone est un indicateur clé du niveau de durabilité d'une entreprise (Schaltegger & Csutora, 2012), mais elle demeure un défi dans le domaine de l'entreposage. Elle consiste à quantifier et gérer les émissions de GES à travers diverses frontières opérationnelles, en s'appuyant souvent sur des cadres comme le Protocole GES**, l'**ISO 14064 (Ascui & Lovell, 2011 ; Dobers et al., 2019) ou encore le Bilan Carbone® en France (ADEME, 2024). Toutefois, ces standards privilégient une approche stratégique de la durabilité, au détriment d'une granularité suffisante pour une prise de décision opérationnelle efficace (Rüdiger, 2016).

Face aux limites des modèles actuels, les JN apparaissent comme une technologie clé pour moderniser le calcul de GES. Ils permettent une analyse granulaire et en temps réel de la consommation des ressources et des émissions de GES, surmontant ainsi les faiblesses des cadres traditionnels, souvent statiques (Drissi Elbouzidi et al., 2023). Par exemple, Seegrün et al. (2023) ont démontré la capacité des JN à optimiser l'utilisation de l'énergie en temps réel, réduisant ainsi les émissions de GES dans les opérations d'entreposage.

Toutefois, bien que les JN offrent un potentiel transformateur, leur adoption dans l'entreposage vert en est encore à ses débuts. De nombreuses entreprises hésitent à investir dans ces technologies en raison de leur coût initial élevé et de la complexité de leur mise en œuvre (Maheshwari et al., 2023). Néanmoins, avec l'évolution des réglementations et

l'importance croissante de la durabilité comme avantage concurrentiel, l'intégration des JN avec les WMS constitue une voie prometteuse vers une gestion des entrepôts à la fois efficace et respectueuse de l'environnement (Kamble et al., 2022).

3 METHODOLOGIE

Avant d'intégrer le suivi environnemental des entrepôts dans un cadre de Jumeaux Numériques, il est essentiel de définir un ensemble complet d'indicateurs environnementaux spécifiques aux activités d'entreposage. L'évaluation des performances est cruciale pour une prise de décision efficace, car une gestion performante repose sur des métriques mesurables (Franceschini et al., 2007). Une revue a permis de poser les bases de ces indicateurs, avec des contributions notables de Torabizadeh et al. (2019), Perotti & Colicchia (2023) et Ahmad et al. (2018). Torabizadeh et al. (2019) ont identifié des métriques de durabilité spécifiques à l'entrepôt via des entretiens avec des experts, tandis que Perotti et al. (2022) ont approfondi ce travail en décomposant les indicateurs de performance environnementale selon les zones fonctionnelles, telles que la réception et le stockage. Ahmad et al. (2018) ont examiné les indicateurs de durabilité dans le domaine manufacturier, offrant une perspective plus large complémentaire aux métriques spécifiques à la logistique. Ces indicateurs ont été sélectionnés en fonction de leur applicabilité à l'entreposage, conformément à la classification des installations logistiques de Rüdiger (2016). Le tableau 1 résume les impacts environnementaux significatifs pour les installations modernes d'entreposage.

Tableau 1. Impacts environnementaux identifiés dans les entrepôts

Catégories	Indicateurs
Utilisation des matières	Matières premières
	Matériaux d'emballage primaire ou secondaire
	Produits chimiques liés à l'emballage
	Matériaux d'outillage
	Consommation d'eau dans le processus
Génération de déchets (tous types de traitement)	Eaux usées et rejets globaux
	Déchets d'emballage
	Restes alimentaires
	Déchets municipaux
	Scories
	Déchets biodégradables
	Production de déchets solides
Consommation d'énergie	Carburant (diesel, essence, etc.), gaz naturel...
	Électricité
Émissions atmosphériques	Émissions directes et indirectes de GES

Cette liste d'indicateurs environnementaux suppose une transformation limitée des matières premières dans les entrepôts, même pour les activités de personnalisation, minimisant ainsi les déchets toxiques. Les principales émissions se limitent aux émissions de GES provenant de l'utilisation d'énergie pour la maintenance et les processus opérationnels, à l'exclusion des particules solides issues des activités manufacturières. Les premières évaluations environnementales dans le cadre des JN n'incluent pas encore le réemploi ou le recyclage des matériaux. De la même manière, la séparation des déchets, les changements d'espaces verts, la biodiversité et les processus administratifs (mobilité du personnel, nettoyage) ne sont pas complètement pris en compte. L'inclusion des activités de bureau reste un défi, car leur localisation (à l'intérieur ou à l'extérieur de l'installation) complique le périmètre du rapport. Les calculs des émissions s'alignent sur le Protocole GES Corporate Standard (Rüdiger, 2016), couvrant les émissions directes et indirectes dans les trois champs d'application.

La méthode de calcul proposée repose sur une approche ascendante simplifiée, permettant la création d'une réplique numérique des actifs physiques et des systèmes. Cela facilite un suivi précis et une optimisation des impacts environnementaux. La méthode évalue les impacts au niveau des ressources, comme les chariots élévateurs, l'éclairage, la climatisation, les palettes et les machines, en prenant en compte leur cycle de vie complet : acquisition (constante), utilisation (cumulative) et fin de vie (constante). Elle utilise la formule standard de calcul de GES (données d'activité multipliées par des facteurs d'émission, Shan et al., 2017) tout en améliorant la précision grâce à des données de suivi au niveau des ressources acquises via le JN. Les étapes du processus sont comme suit (Figure 2) :

- Identification des sources d'impact : Recenser toutes les ressources des entrepôts et leurs facteurs d'impact environnementaux. Collecter des données sur les émissions et l'utilisation des ressources pour une intégration initiale au JN.

- Collecte et traitement des données : Associer chaque ressource à des facteurs d'impact spécifiques, en s'appuyant sur des standards tels que ceux de l'ADEME ou sur des fiches techniques des fournisseurs. Quantifier les émissions pour chaque processus modélisé dans le JN.

- Configuration du JN : Configurer les paramètres d'activité pour chaque ressource dans le JN. Le JN surpasse ici les systèmes traditionnels comme les WMS en permettant de suivre des informations rarement disponibles dans la réalité sans

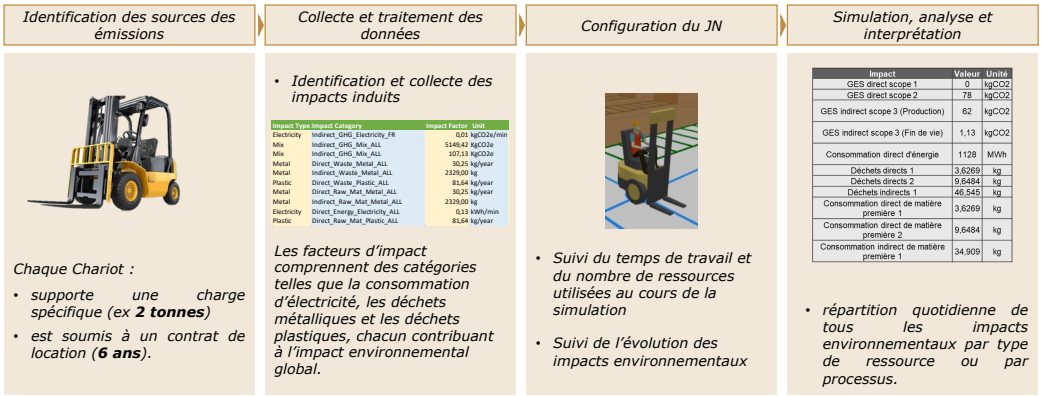


Figure 2. Étapes de modélisation de la comptabilité carbone intégrée dans le JN

instrumentation avancée. Par exemple, le temps de fonctionnement des chariots élévateurs peut être suivi directement grâce au JN pour calculer leurs émissions de processus, ce qui est difficile, voire impossible, dans les entrepôts physiques sans outils spécialisés. Contrairement aux outils conventionnels qui se basent sur des données contractuelles (heures estimées lors de l'achat d'équipement), le JN calcule les impacts en s'appuyant sur des données réelles et des scénarios simulés.

- Simulation, analyse et interprétation : Activer le JN pour simuler les activités logistiques à l'aide des données de charge d'entrepôt issues du WMS, soit sur la dernière année pour des décisions stratégiques, soit en temps réel pour des décisions opérationnelles. Cela permet d'évaluer les impacts environnementaux grâce à une modélisation et une analyse détaillée. Les simulations génèrent des rapports détaillés fournissant des recommandations exploitables sur les performances environnementales de l'entrepôt pour tous les indicateurs du Tableau 1.

4 Étude de Cas et Resultats

L'objectif de cette étude de cas est de fournir une mesure fiable et détaillée de l'impact environnemental d'un entrepôt selon les quatre axes prédéfinis, en utilisant un modèle initialement développé à des fins opérationnelles pour un client de Square Management. Étant donné que l'entrepôt est maintenu à une température régulée, une consommation énergétique élevée est attendue. Étendre l'utilisation de ce modèle à l'évaluation de l'impact environnemental offre une compréhension approfondie des opérations de l'entrepôt, facilitant ainsi l'intégration de la durabilité dans les processus décisionnels. Le système de comptabilisation carbone basé sur les Jumeaux Numériques (Digital Twins - JN) a subi un processus itératif d'étalonnage pour garantir son alignement avec des méthodes établies, telles que le Protocole GES. Cela impliquait une évaluation descendante utilisant la méthode de calcul de GES traditionnelle et un calcul ascendant des émissions des ressources individuelles (comme les chariots élévateurs, les machines, l'éclairage et la ventilation). Cet étalonnage reposait sur des données de consommation énergétique fournies par le distributeur, garantissant que les émissions totales calculées à partir des composants individuels correspondaient aux estimations globales des émissions (Tableau 2).

Tableau 2. Validation descendante vs ascendante pour les Jumeaux Numériques

	Mois 1	Mois 2	Mois 3
Enregistrements d'énergie (MWh)	40	64	64
Estimation d'énergie par DT (MWh)	35	50	49
Nombre de palettes manipulées	44 024	70 345	70 172
Erreur (%)	12	22	23

Une fois étalonnées, les méthodologies traditionnelles et basées sur les JN peuvent être utilisées de manière complémentaire : la première pour les décisions stratégiques rapides, et la seconde pour résoudre les problèmes au niveau opérationnel. Une comparaison entre les données énergétiques générées par le JN et les relevés réels a révélé une marge d'erreur raisonnable (12-23 %), conforme aux normes d'erreur des modèles énergétiques des JN (Agostinelli et al., 2021). Les écarts sont attribués à des facteurs non modélisés, tels que les retours de produits, les déplacements non enregistrés des chariots élévateurs (électriques dans notre cas) et des consommations d'énergie supplémentaires non capturées par la simulation (ex : équipements de bureau).

Pour la présentation des résultats, l'outil français Bilan Carbone® a été utilisé, car il permet de représenter les résultats selon les formats du Protocole GES et de l'ISO 14064. Les outils traditionnels couvrent des catégories d'émissions plus larges (comme les actifs, l'énergie et les activités financières), mais ne permettent pas de distinguer la consommation individuelle de chaque ressource dans les entrepôts. Par ailleurs, des émissions liées à l'immobilier ou aux investissements financiers, bien qu'importantes pour les décisions stratégiques comme l'acquisition de bâtiments, n'affectent pas directement les décisions opérationnelles et ne sont donc pas initialement représentées dans les JN, car elles ne sont pas liées aux variables de contrôle opérationnel.

Les résultats initiaux obtenus via la méthode de calcul traditionnelle et les JN montrent une marge d'erreur globale de 0,09 % sur trois mois (outil traditionnel : 76,19 t CO2eq vs JN : 76,12 t CO2eq). La principale distinction réside dans la méthode JN, qui analyse les émissions selon les ressources impliquées (ex. : énergie, déplacements), plutôt que de les catégoriser par type. Les résultats des JN montrent que les déplacements quotidiens des employés (souvent en véhicules personnels) sont les plus grands contributeurs aux émissions de GES, suivis par l'utilisation de matériaux comme le plastique et le bois pour la manutention et l'emballage des palettes. Les chariots élévateurs, bien qu'identifiés initialement comme pollueurs principaux, contribuent moins que prévu, tout comme l'air conditionné et l'éclairage.

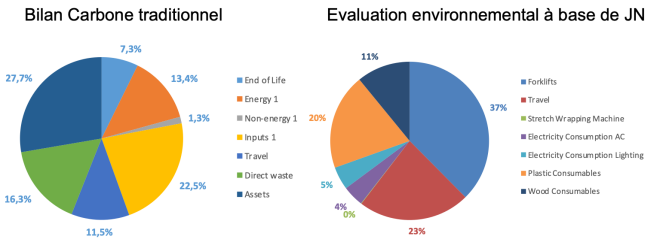


Figure 3. Présentation des résultats : format bilan carbone VS JN

Les conclusions fournis par les JN suggèrent plusieurs actions selon les catégories suivantes :

- Déplacements des employés : Encourager le covoiturage ou l'utilisation des transports publics pour réduire les émissions liées aux déplacements quotidiens.
- Matériaux de manutention : Utiliser des contenants réutilisables et des matériaux biodégradables ou recyclés pour diminuer l'impact des plastiques et du bois.
- Optimisation des chariots élévateurs : Réduire les temps d'inactivité et les déplacements inutiles grâce à une gestion dynamique des tâches par JN.

Dans les entrepôts automatisés, les JN peuvent prioriser les opérations pendant les périodes de disponibilité des énergies renouvelables, réduisant ainsi les émissions et équilibrant la consommation d'énergie. Contrairement aux méthodes traditionnelles qui généralisent les données d'émissions, les JN permettent un suivi précis des processus et fournissent des bilans carbone personnalisés par produit, répondant ainsi aux exigences croissantes en matière de rapports respectueux de

l'environnement. La Figure 4 illustre les émissions de GES quotidiennes mesurées par ressource avec les JN, révélant des détails invisibles pour les outils traditionnels. Par exemple, l'impact réel des trajets domicile-travail des employés ou des emballages plastiques dépasse souvent celui des équipements lourds comme les chariots élévateurs. Les émissions proviennent principalement des déplacements des employés, suivis de l'utilisation de plastique et de bois dans la manutention et l'emballage des palettes. Enfin, la climatisation, l'éclairage et les chariots élévateurs contribuent le moins aux émissions de GES, en excluant les impacts liés à leur production et fin de vie.

L'intégration JN offre des solutions concrètes pour optimiser les opérations. Encourager le covoiturage ou les transports en commun peut réduire les émissions liées aux déplacements des employés. L'utilisation de plastique et de bois dans la manutention peut être optimisée avec des conteneurs réutilisables et des emballages biodégradables ou recyclés. L'optimisation de l'utilisation des chariots élévateurs, via les JN, permet de limiter les temps morts et les mouvements inutiles. Dans les entrepôts automatisés, les JN peuvent prioriser les tâches pendant les périodes où l'énergie renouvelable est disponible, réduisant ainsi les émissions et équilibrant la consommation énergétique.

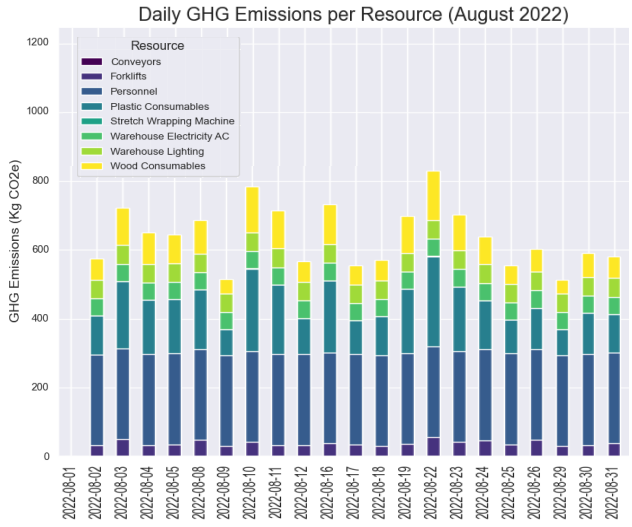


Figure 4. Estimation des émissions quotidiennes grâce aux JN

Contrairement aux méthodes traditionnelles, qui généralisent les données d'émissions, les JN permettent un suivi précis des processus et génèrent des empreintes carbones personnalisées pour chaque produit, répondant ainsi à la demande croissante de rapports environnementaux détaillés. Sans intégration des JN, la gestion repose uniquement sur les systèmes de gestion des entrepôts (WMS), comme le montre le tableau 3. Les JN, en revanche, modélisent avec précision les processus réels, capturant des données que le WMS ne peut pas, comme les mouvements auxiliaires des chariots élévateurs, qui peuvent presque doubler le temps opérationnel.

Tableau 3. Comparaison entre la disponibilité des données pour la comptabilité carbone

Outils	WMS	Jumeau numérique
Chariots élévateurs	45 729 min	92 223 min
Machine à filmer	NA	577 min
Convoyeurs	NA	9 501 min
Déplacements	NA	21 148 km
Consommables plastiques	NA	433 kg
Consommables en bois	NA	43 300 kg

5 Conclusion

Cette étude fait progresser le domaine de la durabilité, notamment le calcul de GES, en comparant la modélisation par Jumeaux Numériques avec des approches traditionnelles telles que le Protocole GES, dans le contexte des opérations intralogistiques. Les JN permettent un suivi en temps réel et granulaire des émissions, en les reliant à des processus spécifiques de l'entrepôt et à des ressources, telles que la consommation énergétique des équipements, la manutention des matériaux et les déplacements des employés. Cela démontre leur potentiel pour faciliter une prise de décision opérationnelle fondée sur des données. Cette approche dynamique permet aux entreprises d'identifier et de traiter les principales sources d'émissions, tout en optimisant leurs pratiques de gestion des entrepôts pour une amélioration environnementale continue.

Cependant, l'étude reconnaît d'importantes limites. Les JN dans ce cas d'étude se concentrent sur les émissions directement liées aux opérations intralogistiques, tout en excluant des facteurs stratégiques plus larges, comme les dépenses financières, le fret et le transport longue distance, qui sont généralement inclus dans les outils traditionnels de calcul carbone. Bien que les JN excellent dans l'optimisation opérationnelle, leur champ d'application plus restreint ne prend pas en compte les émissions indirectement liées aux activités d'entrepôt, telles que celles générées par des partenaires logistiques externes. Étendre la technologie JN pour intégrer les données au niveau de la chaîne d'approvisionnement pourrait combler cette lacune. En outre, la mise en œuvre des JN nécessite des investissements substantiels dans la collecte de données, l'intégration de capteurs et la maintenance. L'exactitude des résultats dépend de la qualité des données d'entrée, telles que les spécifications techniques détaillées des fournisseurs, qui, si elles sont incomplètes, pourraient compromettre la fiabilité du modèle.

Les résultats de l'étude mettent en évidence la complémentarité entre les JN et les méthodes de calcul de GES traditionnelle. Combiner les données opérationnelles détaillées des JN avec la portée globale des outils standards de comptabilité carbone pourrait offrir une approche holistique, permettant aux organisations de prendre des décisions éclairées tant au niveau stratégique qu'opérationnel. Les simulations initiales des opérations d'entrepôt saisonnières ont révélé des enseignements cruciaux. Les déplacements des employés et la consommation de plastique, plus que l'utilisation des chariots élévateurs ou le chauffage, ont été identifiés comme les principaux contributeurs aux émissions de GES, en particulier lors des périodes de pointe comme Noël et Pâques, lorsque la demande augmente. Ces conclusions soulignent l'utilité des JN pour identifier de manière dynamique les domaines spécifiques nécessitant des améliorations, comme la réduction de la

dépendance aux plastiques à usage unique et l'optimisation des horaires des employés pendant les périodes de forte demande.

Les recherches futures devraient se concentrer sur l'amélioration des logiciels de simulation pour intégrer directement les données environnementales dans les bases de données, améliorer la qualité des données et explorer comment les JN peuvent estimer l'empreinte écologique des processus et des produits stockés dans les entrepôts dès le départ. En revenant à la revue de la littérature, la technologie JN est de plus en plus reconnue pour son rôle dans la formation et l'éducation, offrant des simulations dynamiques qui établissent un lien entre les connaissances théoriques et les applications pratiques. De manière similaire, les travaux d'Alexopoulos et al. (2020) mettent en avant le potentiel des JN à optimiser les programmes de formation en offrant des retours en temps réel et un apprentissage basé sur des scénarios. Appliquées à l'entreposage, ces capacités des JN peuvent promouvoir une culture de travail écologique en modélisant des pratiques opérationnelles durables, telles que l'utilisation efficace des équipements énergétiques et les stratégies de réduction des déchets, tout en sensibilisant les employés à l'environnement. En comblant les lacunes actuelles en matière de précision et d'adaptabilité, la technologie JN offre une promesse significative pour faire progresser les pratiques d'entreposage durable.

6 References

ADEME. (2024). Guide méthodologique pour l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre du service de gestion des déchets ménagers et assimilés. La librairie ADEME. https://librairie.ademe.fr/changement-climatique/7436-guide-methodologique-pour-l-evaluation-des-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-du-service-de-gestion-des-dechets-menagers-et-assimiles.html

Agostinelli, S., Cumo, F., Guidi, G., & Tomazzoli, C. (2021). Cyber-Physical Systems Improving Building Energy Management: Digital Twin and Artificial Intelligence. Energies, 14(8), Article 8. https://doi.org/10.3390/en14082338

Ahmad, S., Wong, K. Y., & Rajoo, S. (2018). Sustainability indicators for manufacturing sectors: A literature survey and maturity analysis from the triple-bottom line perspective. Journal of Manufacturing Technology Management, 30, 312–334. https://doi.org/10.1108/JMTM-03-2018-0091

Alexopoulos, K., Nikolakis, N., & Chryssolouris, G. (2020). Digital twin-driven supervised machine learning for the development of artificial intelligence applications in manufacturing. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 33, 1–11. https://doi.org/10.1080/0951192X.2020.1747642

Ali, S. S., Kaur, R., & Khan, S. (2023). Evaluating sustainability initiatives in warehouse for measuring sustainability performance: An emerging economy perspective. Annals of Operations Research, 324(1), 461–500. https://doi.org/10.1007/s10479-021-04454-w

Ascui, F., & Lovell, H. (2011). As frames collide: Making sense of carbon accounting. Accounting, Auditing & Accountability Journal, 24(8), 978–999. https://doi.org/10.1108/09513571111184724

Bank, R., & Murphy, R. (2013). Warehousing Sustainability Standards Development. In V. Prabhu, M. Taisch, & D. Kiritsis (Eds.), Advances in Production Management Systems. Sustainable Production and Service Supply Chains (pp. 294–301). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41266-0_36

Bartolini, M., Bottani, E., & Grosse, E. (2019). Green warehousing: Systematic literature review and bibliometric analysis. Journal of Cleaner Production, 226, 242–258. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.055

Beltrami, M., Orzes, G., Sarkis, J., & Sartor, M. (2021). Industry 4.0 and sustainability: Towards conceptualization and theory. Journal of Cleaner Production, 312, 127733. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127733

Carrières, V., Lemieux, A.-A., Margni, M., Pellerin, R., & Cariou, S. (2022). Measuring the Value of Blockchain Traceability in Supporting LCA for Textile Products. Sustainability, 14(4), Article 4. https://doi.org/10.3390/su14042109

Curran, M. A. (2013). Life Cycle Assessment: A review of the methodology and its application to sustainability. Current Opinion in Chemical Engineering, 2(3), 273–277. https://doi.org/10.1016/j.coche.2013.02.002

DHL. (2023, November). Carbon Accounting Methods. DHL. https://www.dhl.com/global-en/delivered/responsibility/carbon-accounting-methods.html

Dobers, K., Ehrler, V. C., Davydenko, I. Y., Rüdiger, D., & Clausen, U. (2019). Challenges to Standardizing Emissions Calculation of Logistics Hubs as Basis for Decarbonizing Transport Chains on a Global Scale. Transportation Research Record, 2673(9), 502–513. https://doi.org/10.1177/0361198119844252

Drissi Elbouzidi, A., Ait El Cadi, A., Pellerin, R., Lamouri, S., Tobon Valencia, E., & Bélanger, M.-J. (2023). The Role of AI in Warehouse Digital Twins: Literature Review. Applied Sciences, 13(11), Article 11. https://doi.org/10.3390/app13116746

EcoTransIT World. (2020, September 21). EcoTransIT World |. https://www.ecotransit.org/fr/

Franceschini, F., Galetto, M., & Maisano, D. (2007). Management by Measurement: Designing Key Indicators and Performance Measurement Systems. Springer Science & Business Media.

Green logistics: Improving the environmental sustainability of logistics. (2010). Kogan Page.

GRI. (2023). GRI - Home. https://www.globalreporting.org/

Happonen, A., & Minashkina, D. (2021). A Systematic Literature Mapping of Current Academic Research Connecting Sustainability into the Warehouse Management Systems Context (pp. 52–80). https://doi.org/10.9734/bpi/castr/v5/9667D

Ibrahim, A., Fernando, Y., Tseng, M.-L., & Lim, M. K. (2024). Low-carbon warehousing practices and challenges: Insights from emerging country. International Journal of Logistics Research and Applications, 27(8), 1410–1429. https://doi.org/10.1080/13675567.2022.2145276

Jakšič, M., & Budler, M. (2020). Environmental-sustainability Aspect in the Outsourcing of Business-logistics Services. https://doi.org/10.1108/978-1-80043-972-620201009

Kamble, S. S., Gunasekaran, A., Parekh, H., Mani, V., Belhadi, A., & Sharma, R. (2022). Digital twin for sustainable manufacturing supply chains: Current trends, future perspectives, and an implementation framework. Technological Forecasting and Social Change, 176, 121448. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121448

Kumar, V., & Adil, G. K. (2024). Sustainable warehouse management: A literature review and future research agenda. Management Research Review, ahead-of-

print(ahead-of-print). https://doi.org/10.1108/MRR-03-2024-0226

Maheshwari, P., Kamble, S., Kumar, S., Belhadi, A., & Gupta, S. (2023). Digital twin-based warehouse management system: A theoretical toolbox for future research and applications. The International Journal of Logistics Management, 35(4), 1073–1106. https://doi.org/10.1108/IJLM-01-2023-0030

Martini, B., Bellisario, D., & Coletti, P. (2024). Human-Centered and Sustainable Artificial Intelligence in Industry 5.0: Challenges and Perspectives. Sustainability, 16(13), Article 13. https://doi.org/10.3390/su16135448

Maury, T., Loubet, P., Serrano, S. M., Gallice, A., & Sonnemann, G. (2020). Application of environmental life cycle assessment (LCA) within the space sector: A state of the art. Acta Astronautica, 170, 122–135. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.01.035

MAZAREANU, E. (2021), "NUMBER OF WAREHOUSES WORLDWIDE FROM 2018 TO 2025, BY REGION", AVAILABLE AT: HTTPS://WWW.STATISTA.COM/STATISTICS/1223289/WAREHOUSES-WORLDWIDE-REGION/.

Michel, R. (2024). 2024 Warehouse/DC Operations Survey: Technology adoption on the rise. New SCMR. https://www.scmr.com/article/2024-warehouse-dc-operations-survey-technology-adoption-on-the-rise

Minashkina, D. (2024). A review and research agenda for recent socially and environmentally sustainable practices for warehouse management systems. The International Journal of Logistics Management, 35(7), 60–98. https://doi.org/10.1108/IJLM-07-2023-0265

Minashkina, D., & Happonen, A. (2023). Warehouse Management Systems for Social and Environmental Sustainability: A Systematic Literature Review and Bibliometric Analysis. Logistics, 7(3), Article 3. https://doi.org/10.3390/logistics7030040

Pehnt, M. (2006). Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies. Renewable Energy, 31(1), 55–71. https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.03.002

Perotti, S., & Colicchia, C. (2023). Greening warehouses through energy efficiency and environmental impact reduction: A conceptual framework based on a systematic literature review. The International Journal of Logistics Management, 34(7), 199–234. https://doi.org/10.1108/IJLM-02-2022-0086

Ries, J., Grosse, E., & Fichtinger, J. (2016). Environmental impact of warehousing: A scenario analysis for the United States. International Journal of Production Research, 55. https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1211342

Rüdiger, D. (2016). Managing Greenhouse Gas Emissions from Warehousing and Transshipment with Environmental Performance Indicators.

Schaltegger, S., & Csutora, M. (2012). Carbon accounting for sustainability and management. Status quo and challenges. Journal of Cleaner Production, 36, 1–16. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.06.024

Seegrün, A., Kruschke, T., Mügge, J., Hardinghaus, L., Knauf, T., Riedelsheimer, T., & Lindow, K. (2023). Sustainable product lifecycle management with Digital Twins: A systematic literature review. Procedia CIRP, 119, 776–781. https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.03.124

Shan, Y., Guan, D., Liu, J., Mi, Z., Liu, Z., Liu, J., Schroeder, H., Cai, B., Chen, Y., Shao, S., & Zhang, Q. (2017). Methodology and applications of city level CO2 emission accounts in China. Journal of Cleaner Production, 161, 1215–1225. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.075

Shaw, S., Grant, D., & Mangan, J. (2020). A supply chain practice-based view of enablers, inhibitors and benefits for environmental supply chain performance measurement. Production Planning & Control, 32, 1–15. https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1737977

Torabizadeh, M., Mohd Yusof, N., Ma'aram, A., & M Shaharoun, A. (2019). Identifying sustainable warehouse management system indicators and proposing new weighting method. Journal of Cleaner Production, 248, 119190. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119190

CIGI QUALITA MOSIM 2025

Social Key Performance Indicator into Sustainable Supply Chains: a review

MONICA-JULIANA PEREZ[1], TARIK CHARGUI[1], DAMIEN TRENTESAUX[1]

[1] LAMIH, UMR CNRS 8201, Université Polytechnique Hauts-de-France, Le Mont Houy, 59313, Valenciennes, France
monica.perezmorales@uphf.fr, tarik.chargui@uphf.fr, damien.trentesaux@uphf.fr

Abstract – The incorporation of social Key Performance Indicators (KPIs) into sustainable supply chain management (SSCM) is a growing yet underexplored area of research. Social KPIs, which address critical aspects such as worker welfare, equity, and social responsibility, play a pivotal role in achieving the triple bottom line of sustainability. Despite the increasing volume of primary and secondary studies on SSCM, the social dimension remains underrepresented compared to environmental and economic factors. This study conducts a Systematic Literature Review (SLR) to analyze the integration of social KPIs into sustainable supply chains, focusing on their measurement, implementation, and alignment with broader sustainability objectives. The review follows a systematic approach using Scopus, applying specific keywords and inclusion criteria to identify peer-reviewed papers published between 2018 and the present. Articles were analyzed for the identification of research clusters and trends. The analysis highlights a growing emphasis on social KPIs but underscores the need for standardized frameworks and innovative solutions to address challenges such as data complexity and trade-offs between sustainability dimensions.

Keywords – Social Key Performance Indicators (KPIs), Sustainable Supply Chain Management, Triple Bottom Line, Social Sustainability

1 INTRODUCTION

Global market competition has expanded dramatically during the previous few decades. Market demands have increased considerably in terms of the quality and reaction time required by consumers. The modern business context is defined by rising globalization, which causes firms to face increased competitiveness, cost pressures, and complexity (Hutchins & Sutherland, 2008). Supply Chain Management (SCM) strategies have emerged as a critical component for bridging this gap. On the one hand, firms are constantly compelled to gain a competitive edge, with the ultimate objective of creating greater value for not only shareholders but all stakeholders. However, the growing importance of sustainability in business operations and the ongoing disagreement over the most effective approach have led to a strong commitment by the scientific community to study these topics (Seuring & Müller, 2008).

Key performance indicators (KPIs) are critical for assessing and improving SCM. Simões (2014) suggests that while economic parts are well established, social and environmental concerns require additional development. The lack of established frameworks and widely acknowledged measures for social and environmental sustainability hinders efforts to conduct a comprehensive evaluation. Despite growing recognition of the relevance of these aspects, there are still gaps in how organizations include social equality, community impact, and environmental stewardship into their supply chain evaluations. The lack of a comprehensive framework for analyzing social sustainability in supply chains necessitates including stakeholder factors into decision-making processes (Simões, 2014).

This study is motivated by the growing emphasis on sustainability in supply chains, particularly the incorporation of social KPIs. The objective is to provide an inclusive analysis of the available literature through a scoping literature review (SLR) that synthesizes existing research on social KPIs in the context of sustainable supply chains. By identifying and analyzing primary and secondary studies, this review aims to uncover gaps, highlight trends, and provide a comprehensive understanding of the role social KPIs play in achieving

sustainability goals. This study contributes to the literature by offering a cohesive synthesis of existing works and outlining an analytical framework to guide future research. Other studies focused more on sustainability in supply chains, identifying key mechanisms and configurations to improve outcomes (Koberg & Longoni, 2019). Additionally, some studies demonstrated how Industry 4.0 technologies can enhance sustainable logistics, providing insights for businesses while acknowledging limitations in scope and the need for further research (Sun et al., 2022). The remainder of the article is organized as follows. Section 2 presents key concepts about supply chain and sustainability. The methodology and the results obtained are reported in Section 3. Section 4 summarizes and analyses the results. Finally, the main conclusions and for future research are presented in Section 5.

2 KEY CONCEPTS

2.1 Supply chain management

The SCM has undergone significant transformation since its inception, evolving from an operational, process-oriented focus to a more strategic and integrative approach. Contemporary definitions highlight this shift, such as the one provided by (Mentzer et al., 2001), which describes SCM as the systematic and strategic alignment of traditional business functions and their associated tactics, both within individual organizations and across the broader supply chain network, with the ultimate goal of enhancing the long-term performance of both individual entities and the entire supply chain.

SCM encompasses the comprehensive oversight of the flow of goods and services, spanning all processes from sourcing raw materials to delivering the final product to customers (Bagaria, 2021). It integrates upstream and downstream activities to maximize operational efficiency and customer value (Kleab, 2017), covering diverse functions such as production planning, inventory management, and logistics. This evolution reflects the growing complexity and strategic importance of SCM in creating value across interconnected networks.

2.2 Performance measurement in sustainable supply chains

Sustainable supply chain management (SSCM) has became crucial for businesses, offering competitive advantages and ensuring corporate survival (Jianxin Xu & Hecheng Wang, 2008). The concept of the "triple bottom line" refers to a holistic framework for sustainability that emphasizes the integration of economic, environmental, and social dimensions in organizational performance (Elkington, 1997). This paradigm underpins much of the contemporary discourse on sustainability metrics and provides a normative foundation for evaluating supply chain impacts across multiple stakeholder dimensions. SSCM involves considering environmental and social impacts throughout the supply chain (Arora & Walia, 2015). Performance measurement in sustainable supply chains gained significant attention in recent years as organizations strive to align their operations with sustainability objectives. The integration of performance measurement (PM) systems is crucial for enabling collaboration, transparency, and supplier evaluation, core elements of sustainable SCM (Beske-Janssen et al., 2015). Beyond compliance and risk management, PM systems drive innovation in Supply Chains, helping organizations reduce costs, improve efficiency, and strengthen competitive advantages (Schaltegger & Burritt, 2014). Additionally, PM enables organizations to identify opportunities and manage trade-offs across economic, environmental, and social dimensions, while supporting sustainability reporting and the implementation of strategic goals (Kruger et al., 2022). Also, the companies implement new technologies to support the PM and the decision-making process to improve the performance. The study by Berrah et al. (2024) evaluate the ethical impact of artificial intelligence in industrial systems and the interaction with humans' expertise in the decision-making process.

Despite progress, performance measurement in sustainable supply chains is a key factor to improve the sustainability of supply chains. Challenges such as the complexity of multi-stakeholder considerations and the lack of unified standards persist (Tajbakhsh & Hassini, 2015). Additionally, recent research has increasingly focused on integrating sustainability dimensions into supply chain operations and decision-making processes. The next section presents the methodology and papers collection and selection.

3 SCOPING LITERATURE REVIEW

In this section we present the study conducted, and report the results obtained.

3.1 Methodology

This study is categorized as a Systematic Literature Review (SLR) (Correia et al., 2017), which seeks to find all pertinent literature on the topic rather than being guided by a specific research question as is the case with a systematic review (Peters et al., 2015). Giving a general overview of the subject, emphasizing important discoveries, and pointing out

research gaps in the body of current knowledge are the goals (Arksey & O'Malley, 2005).
This SLR aims to discover and assess peer-reviewed publications that provide evidence for the integration of social KPI into sustainable supply chains. The research topics that guide this evaluation are intended to investigate definitions, frameworks, and issues related with adding social KPIs into supply chains while remaining aligned with sustainability objectives.

- How have social KPIs been defined and measured in supply chains?
- How do social KPIs align or conflict with environmental and economic KPIs in achieving sustainability goals?

3.2 Material collection

Scopus was the scientific database used in the searches. For that database, a collection of keywords was created and organized into three subject areas, as indicated in Table 1. To provide context for the search, Group A includes keywords related to supply chains and logistics. Group B focuses on terms associated with performance measurement methods. Group C incorporates keywords related to social KPIs, while Group D covers sustainability and its three pillars.
While the Boolean operator AND was used to link the groups together and determine the relationships between the themes, the Boolean operator OR was used to combine the keywords within each group to create the final keyword list for the search.

Group	Keywords
Group A: Supply Chain	"supply chain", "smart supply chains", "supply chain management", "logistic"
Group B: Performance Measurement	"key performance indicator*", "metric*", "performance evaluation", "sustainability performance indicators"
Group C: Social Dimension	"social", "social performance measure", "worker welfare", "social equity"
Group D: Sustainability	"sustainability", "sustainable development", "environmental, social, and governance (ESG)", "triple bottom line"

Table 1: Search terms

The search included only articles written in English and focused exclusively on peer-reviewed journal publications to ensure high-quality and reliable sources. The scope was restricted to articles published between 2018 and the present, ensuring that the findings are relevant to contemporary practices and trends. The search was conducted in the title, abstract, and keyword fields to maximize the retrieval of relevant studies while maintaining a targeted approach. Additional search criteria excluded unrelated scientific fields and focused mainly on especially in tangible goods and manufacturing supply chains, sustainability, and social KPIs. These criteria were applied to refine the search and to provide a comprehensive yet relevant collection of articles for the scoping literature review.

3.3 Material selection

The selection process was divided into two stages. In the first stage, titles, abstracts, and keywords were screened, and articles were categorized as included, excluded, or classified as "undefined" based on specific inclusion and exclusion criteria. Table 2 describe the inclusion and exclusion criteria used to identify sources.

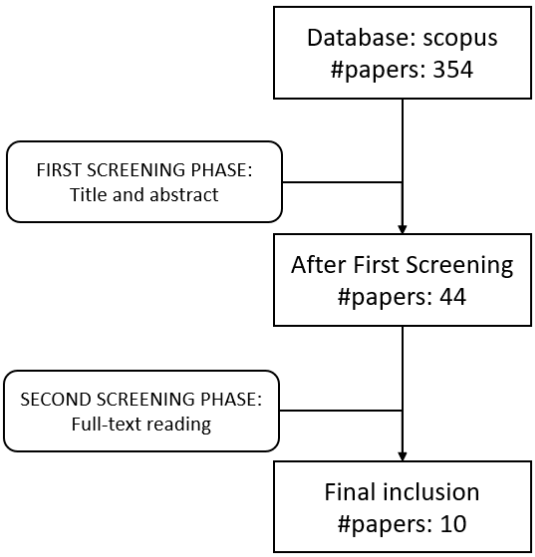


Figure 1: Literature review process

In the second stage, the full text of articles included in the first screening phase was reviewed. Papers were assessed against the criteria for a definitive decision on inclusion. Articles for which the full text was not accessible were excluded from the final selection.

4 RESULTS AND ANALYSIS

Figure 1 depicts the systematic literature review methodology used in this investigation. The initial search in the Scopus database turned up 354 publications. 44 papers were recognized as appropriate for further consideration during the initial screening step, which included an analysis of titles and abstracts. During the second screening step, which included full-text reading, ten publications were selected for inclusion based on the predetermined criteria described in the methodology.

The co-occurrence network analysis of keywords reveals a prominent focus on the concept of "sustainability," which serves as the central node in the research landscape. The network identifies

Section	Subsection	Content	Description
A. Search criteria			
	A.1	Language	English
	A.2	Scientific area(s)	Excluded: Medicine, Health professions, Neuroscience and areas related.
	A.3	Source type(s)	Limited to Journals and Conferences
	A.4	Journal(s)	Only peer-reviewed
	A.5	Article type(s)	Limited to articles
	A.6	Search field(s)	Title, abstract and keywords
	A.7	Date of publication	From 2018 until present
B. Inclusion criteria			
	B.1	Explicitly define or measure social KPIs	
	B.2	Follows sustainability approach	
	B.3	Subject is one or more supply chain functions	
C. Exclusion criteria			
	C.1	Editorials or conference proceedings	
	C.2	Tertiary studies or literature review	
	C.3	Examines only one or two sustainability pillars (e.g., environmental and economic) without considering social KPIs.	
	C.4	Not supply chain perspective	
	C.5	Opinion pieces or non-empirical studies without clear methodology	
	C.6	Sustainability is a secondary aspect	

Table 2: Selection criterias

significant interconnections between "sustainability" and related themes such as "supply chain management," "sustainable development," and "social sustainability." These connections underscore the holistic nature of sustainability in supply chain research, encompassing both environmental and social dimensions. Emerging clusters around "resilience," "decision making," and "economic and social effects" highlight the multidimensional challenges addressed in this domain. The findings of the SLR highlight many debate areas. Specifically, by extracting material from the existing literature, this has been compiled into subject parts that enable us to establish research clusters in the area of interest list as follows:

- Clustering social KPIs based on Sustainability Dimensions for Supply Chains
- Integration of social KPIs
- Role of Simulation in Balancing Sustainability KPIs

The next subsections go into further explanation about the debate areas.

4.1 Clustering social KPIs based on Sustainability Dimensions for Supply Chains

Several studies have called attention to the gap where economic and environmental KPIs are amply used, while social KPIs receive less attention or have a less precise implementation (Duque-Uribe et al., 2024; Kumar et al., 2022; Sangwan et al., 2019). Many frameworks have their main focus on reducing expenses and carbon footprints, but decision-making models partially incorporate social factors like labor (Allaoui et al., 2018; Babagolzadeh et al., 2020). The literature research reveals that social KPIs are important but underutilized measures. Two primary categories can be used to cluster the social component of supply chains: labor indicators and community development.

The labor indicators consider factors including gender equity, labor rights, employee satisfaction, and worker health and safety. These KPIs have a close connection to the company's or industry's perception. For instance, health and safety standards are frequently evaluated using measures including workplace accident rates, safety procedure implementation, and employee training investments (Duque-Uribe et al., 2024; Sangwan et al., 2019). Another important social KPI is the gender equity that can be evaluated through metrics such as the percentage of women in leadership roles or the implementation of inclusion initiatives that support marginalized groups (Allaoui et al., 2018).

According to (Kumar et al., 2022), improving labor conditions, such as fair compensation and professional development opportunities, boosts employee retention and productivity, hence contributing to economic growth. Similarly, (Babagolzadeh et al., 2020) observed that effective health and safety rules reduce absenteeism and accidents while ensuring operational continuity and efficiency. On the other hand, community development KPI measurement has a more general

and global perspective and focuses on measuring the influence around the supply chain. Organizations and stakeholders may benefit from proactive social sustainability measures that significantly lessen these effects (Babagolzadeh et al., 2020; Zhao et al., 2020). KPIs for community development include investments in infrastructure and the generation of local jobs. Furthermore, the combination of labor and community development indicators has demonstrated tangible effects (Ali et al., 2024). Studies of agro-food supply chains by Allaoui et al., (2018) emphasize the relevance of job creation and fair-trade practices as key social performance indicators.

One of the primary challenges in the implementation of social KPIs is their subjective identity. Unlike economic KPIs, which are commonly represented in monetary terms, or environmental KPIs, which are linked to visible outputs like carbon emissions, social KPIs sometimes rely on proxies or subjective judgments. Metrics such as "worker satisfaction" or "community engagement" are typically generated from stakeholder surveys or expert evaluations, as demonstrated in the research of (Duque-Uribe et al., 2024) , (Allaoui et al., 2018) and (Kazancoglu et al., 2024). (Sangwan et al., 2019) emphasize this difficulty, stating that while social indicators are important, they lack the defined standards required for widespread acceptance in industrial applications.

4.2 Integration of social KPIs

From a methodological perspective, the reviewed literature suggests diverse approaches to operationalizing KPIs. Kumar et al. (2022) highlight the potential of quantitative frameworks for balancing social, economic, and environmental objectives. In particular, fuzzy Analytic Hierarchy Process (fuzzy-AHP) and Mixed-Integer Linear Programming (MILP) models allow for the incorporation of qualitative social dimensions, such as employee well-being and community impact, into optimization frameworks. However, these approaches rely on assumptions or limited datasets. The case study by Yadav et al., (2021), focusing on food distribution networks in India, further illustrates the challenges of integrating social KPIs such as equitable access and customer satisfaction, which are inherently contextual and difficult to generalize.

Despite these limitations, there are a lot of chances to advance the use of social KPIs in supply chain management related to new technological advances and approaches.

One of the key areas of concern is still how to balance the sustainability dimensions. Some studies had explored the implementation of multi-objective optimization models to manage the trade-offs between social, environmental, and economic objectives (Babagolzadeh et al., 2020). For example, prioritizing fair compensation and safe working conditions may increase operational costs in the near term but result in long-term benefits such as increased staff retention and brand reputation. Allaoui et al. (2018) demonstrate that investments in community development can promote goodwill and provide shared value, even if they initially conflict with cost-minimization goals.

Also, some frameworks emphasize the significance of adapting social KPIs to the specific characteristics of various businesses and areas. Duque-Uribe et al. (2024) present a structured instrument to evaluate the social implications of hospital supply chain operations in accordance with organizational performance indicators. Similarly, Sangwan et al. (2019) argue for the inclusion of region-specific social indicators, which recognize the contextual diversity of supply chain operations.

4.3 Role of Simulation in Balancing Sustainability KPIs

Simulation approaches have emerged as an active approach to sustainability research, providing an accurate technique of investigating trade-offs between different objectives. Models created by Yadav et al. (2021) use multi-objective optimization to balance economic, environmental, and social KPIs. This model demonstrates how to effectively control trade-offs using advanced decision-making methods, including fuzzy logic, MILP, and system dynamics. For example, Kumar et al. (2022)'s fuzzy-AHP paradigm provides dynamic weights to sustainability characteristics, allowing decision-makers to prioritize objectives based on current demands. The flexibility of simulation models makes them particularly suitable for addressing the complexities of supply chains.

Case studies serve a key function in validating theoretical and simulation models. Case studies, as demonstrated by Sangwan et al. (2019), (Javanmardan et al., 2024) and Allaoui et al. (2018), can help discover industry-specific obstacles and possibilities. For example, Sangwan et al. (2019) created a sustainability assessment framework for the cement industry that emphasizes emission management and resource efficiency, reflecting the sector's unique environmental problems. (Javanmardan et al., 2024) demonstrate that balancing costs, emissions, and social responsiveness is possible through dynamic allocation for a sustainable fruit Closed-Loop Supply Chain.

Similarly, Allaoui et al. (2018) employ a case study approach to assess the usefulness of their two-stage

hybrid decision-making model in agro-food supply chains. While simulation models and case studies offer valuable insights into sustainability trade-offs, their effectiveness is limited by context-specific assumptions and the challenge of generalizing findings across diverse supply chain environments.

One notable limitation in integrating social KPIs lies in their often qualitative or perceptual nature, which poses challenges for mathematical modeling and optimization. Most multi-criteria decision-making or MILP-based approaches rely on quantifiable inputs. To incorporate qualitative dimensions such as worker well-being or community engagement, methodological adaptations are necessary. Without such adjustments, these models risk oversimplifying complex social dynamics.

5 Conclusions and research opportunities

This study conducts an analysis in the literature review of social Key Performance Indicators (KPIs) within the context of sustainable supply chain management. This study emphasizes the need for a balanced approach to integrating social KPIs, particularly in addressing trade-offs with economic efficiency and environmental objectives. By categorizing social KPIs into labor indicators and community development metrics, it emphasizes how the supply chain impact must be measured both inside and outside the network. Advanced methodologies such as multi-objective optimization models and simulation present opportunities to quantify, monitor, and manage these trade-offs effectively.

Despite immense advances in sustainability studies, numerous limits remain. First, focusing on simulations and theoretical models limits the generalizability of conclusions. Second, the emphasis on particular industries, such as agri-food and cement, limits the findings' application to other sectors. Expanding the research scope to include a wider range of sectors and supply chain topologies would provide a more complete picture.

The development of standardized measures and approaches for social sustainability should be prioritized in future study. While studies like Sangwan et al. (2019) and Babagolzadeh et al. (2020) incorporate social KPIs, they are frequently eclipsed by economic and environmental KPIs. One emerging concept that holds promise for improving the integration of social sustainability within supply chains is the Physical Internet (PI). PI-based logistics, which envisions an interconnected, open, and standardized freight system, can facilitate the equitable distribution of benefits across supply chain stakeholders, enhance working conditions, and promote ethical labor practices (Montreuil et al., 2012).

Also, a responsible incorporation of future technologies, such as artificial intelligence, opens up new possibilities for enhancing sustainability. These technologies can improve data collection transparency, and real-time decision-making, addressing some of the shortcomings of present methods. But it also important take in consideration frameworks as ETHICS40 that highlights the risks of over-reliance on AI-driven decision-making, particularly in performance measurement systems (Berrah et al., 2024).

Acknowledgement. Parts of the work presented in this paper are carried out in the context of the ANR ETHICS40 (ANR-236CE1060014) research program.

6 References

Ali, B. M., Majeed, M. A., Latif, N., & Aldrickzler, R. (2024). Sustainable Supply Chain Management Practices for Environmental and Social Integrity. *Journal of Ecohumanism*, *3*(5), 1000–1016. Scopus.

Allaoui, H., Guo, Y., Choudhary, A., & Bloemhof, J. (2018). Sustainable agro-food supply chain design using two-stage hybrid multi-objective decision-making approach. *Computers & Operations Research*, *89*, 369–384.

Arksey, H., & O'Malley, L. (2005). Scoping studies: Towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*.

Arora, A., & Walia, M. (2015). *Sustainable supply chain*.

Babagolzadeh, R., Rezaeian, J., & Khatir, M. V. (2020). Multi-objective fuzzy programming model to design a sustainable supply chain network considering disruption. *International Journal of Industrial Engineering and Production Research*, *31*(2), 217–229. Scopus.

Bagaria, O. (2021). *Supply Chain Management Concepts*.

Berrah, L., Trentesaux, D., & Jimenez, J.-F. (2024). Ethics in Performance Management of Future Industrial Systems: Weak and Strong Views. *Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future*, 457–468.

Beske-Janssen, P., Johnson, M. P., & Schaltegger, S. (2015). 20 years of performance measurement in sustainable supply chain management – what has been achieved? *Supply Chain Management: An International Journal*, *20*(6), 664–680.

Correia, E., Carvalho, H., Azevedo, S. G., & Govindan, K. (2017). Maturity Models in Supply Chain Sustainability: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, *9*(1),

Duque-Uribe, V., Sarache, W., & Gutiérrez, E. V. (2024). Design and validation of a structured instrument to assess the influence of sustainable supply chain management practices on sustainable performance in hospitals. *International Journal of Lean Six Sigma*, *15*(1), 103–130. Scopus.

Hutchins, M. J., & Sutherland, J. W. (2008). An exploration of measures of social sustainability and their application to supply chain decisions. *Journal of Cleaner Production*, *16*(15), 1688–1698. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.06.001

Javanmardan, A., Golpîra, H., & Baradaran, V. (2024). A socio-economic and quality-oriented optimal fruit supply chain network design in a multi-market and multi-product environment: A real case study. *Socio-Economic Planning Sciences*, *94*. Scopus.

Jianxin Xu & Hecheng Wang. (2008). Build competitive advantage through the integration of sustainable supply chains. *2008 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics*, 2177–2180. 2008 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI).

Kazancoglu, Y., Ekinci, E., Mangla, S. K., Sezer, M. D., Choudhary, S., & Dora, M. (2024). Smart Closed-Loop Food Supply Chain in Circular Economy. *IEEE Transactions on Engineering Management*, *71*, 12346–12363. Scopus.

Kleab, K. (2017). *Important of Supply Chain Management*. *7*(9).

Koberg, E., & Longoni, A. (2019). A systematic review of sustainable supply chain management in global supply chains. *Journal of Cleaner Production*, *207*, 1084–1098.

Kruger, S. D., Zanin, A., Durán, O., & Afonso, P. (2022). Performance Measurement Model for Sustainability Assessment of the Swine Supply Chain. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(16). Scopus.

Kumar, M., Sharma, M., Raut, R. D., Mangla, S. K., & Choubey, V. K. (2022). Performance assessment of circular driven sustainable agri-food supply chain towards achieving sustainable consumption and production. *Journal of Cleaner Production*, *372*. Scopus.

Mentzer, J. T., DeWitt, W., Keebler, J. S., Min, S., Nix, N. W., Smith, C. D., & Zacharia, Z. G. (2001). Defining Supply Chain Management. *Journal of Business Logistics*, *22*(2), 1–25.

Montreuil, B., Meller, R. D., & Ballot, E. (2012). Physical Internet Foundations. *IFAC Proceedings Volumes*, *45*(6), 26–30.

Peters, M., Godfrey, C., Mcinerney, P., Soares, C., Khalil, H., & Parker, D. (2015). *Methodology for JBI Scoping Reviews* (pp. 1–24).

Sangwan, K. S., Bhakar, V., & Digalwar, A. K. (2019). A sustainability assessment framework for cement industry – a case study. *Benchmarking*, *26*(2), 470–497. Scopus.

Schaltegger, S., & Burritt, R. (2014). Measuring and managing sustainability performance of supply chains: Review and sustainability supply chain management framework. *Supply Chain Management: An International Journal*, *19*(3), 232–241.

Seuring, S., & Müller, M. (2008). From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, *16*(15), 1699–1710.

Sun, X., Yu, H., Solvang, W. D., Wang, Y., & Wang, K. (2022). The application of Industry 4.0 technologies in sustainable logistics: A systematic literature review (2012–2020) to explore future research opportunities. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(7), 9560–9591.

Tajbakhsh, A., & Hassini, E. (2015). A data envelopment analysis approach to evaluate sustainability in supply chain networks. *Journal of Cleaner Production*, *105*, 74–85.

Yadav, V. S., Singh, A. R., Raut, R. D., & Cheikhrouhou, N. (2021). Design of multi-objective sustainable food distribution network in the Indian context with multiple delivery channels. *Computers and Industrial Engineering*, *160*. Scopus.

Zhao, D., Wang, T., & Han, H. (2020). Approach towards sustainable and smart coal port development: The case of Huanghua port in China. *Sustainability (Switzerland)*, *12*(9). Scopus.

CIGI QUALITA MOSIM 2025

Enhancing Public Transport with Demand-Responsive Services: A Metaheuristic Approach

LOUISE PENZ[1], CHRISTOPHE DUHAMEL[1], ÉRIC SANLAVILLE[1]

[1] Université Le Havre Normandie, Univ Rouen Normandie, INSA Rouen Normandie, Normandie Univ, LITIS UR 4108 F-76600 Le Havre, France
{louise.penz,christophe.duhamel,eric.sanlaville}@univ-lehavre.fr

Résumé

Les systèmes de transport public manquent souvent de flexibilité, notamment pour les usagers vivant ou travaillant dans des zones mal desservies. Pour pallier ce problème, wIDARP étend le DARP en intégrant des options de transport multi-modal et en permettant aux passagers de marcher lorsque leur point de prise en charge / dépose est proche d'un arrêt de transport en commun. Un service de véhicules flexible complète le réseau fixe, améliorant l'efficacité et réduisant les temps de trajet. L'objectif est de minimiser les coûts de transport.

Nous proposons une approche hybride pour résoudre wIDARP. La programmation par contraintes calcule des solutions initiales réalisables, tandis que des heuristiques — une gloutonne et une Large Neighborhood Search (LNS) — génèrent rapidement de bonnes solutions. Une seconde LNS affine ces solutions en utilisant plusieurs structures de voisinage, comme les suppressions aléatoires et ciblées, suivies d'insertions optimisées.

Des expérimentations sur des instances de référence et sur le réseau du Havre montrent que nos méthodes réduisent le nombre de véhicules nécessaires. wIDARP offre des améliorations en intégrant la marche, réduisant ainsi les coûts d'exploitation et l'utilisation des véhicules. Ces résultats soulignent les avantages de combiner flottes fixes et flottes à la demande pour améliorer l'efficacité du transport urbain.

Abstract

Public transport systems often lack flexibility, particularly for customers living or working in poorly connected areas. To address this, wIDARP extends the traditional DARP by incorporating multi-modal transport options and allowing passengers to walk when their pickup / drop-off locations are near a transit stop. A flexible vehicle service complements public transit, enhancing efficiency and reducing travel times. The objective is to minimize the routing costs.

To tackle this problem, we develop multiple solution approaches. Constraint programming ensures feasible initial solutions, while heuristic methods—including a greedy heuristic and a Large Neighborhood Search (LNS) heuristic—quickly generate good solutions. Additionally, another LNS metaheuristic further refines results by using various neighborhood structures, such as random, worst-request, and related-request removals, followed by best-cost or regret-based insertions.

Experiments on benchmark datasets and real-world cases from Le Havre's transport network confirm that our methods significantly reduce the number of required vehicles. wIDARP provides notable improvements over DARP, even by integrating walking, thereby lowering both operational costs and vehicle utilization. These findings highlight the benefits of combining fixed-route fleets with demand-responsive fleets to improve urban transport efficiency.

***Mots clés* – transport à la demande, transport public, multimodal, LNS.**

***Keywords* – DARP, public transit, multimodal, LNS.**

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Solution methods for the VRP with sharing of deliveries between producers in local food logistic

ADRIEN CALLICO[1], , JEAN-CHARLES BILLAUT[1,2] PIERRE DESPORT[1], CAROLINE PRODHON[3]…

[1] Université de Tours, LIFAT, France
{adrien.callico,pierre.desport,jean-charles.billaut}@univ-tours.fr
[2] LAAS CNRS, Université de Toulouse, CNRS, Toulouse
[3] UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE TROYES, LIST3N, FRANCE
caroline.prodhon@utt.fr

Mots clés **- Circuits Courts Alimentaires de Proximité, VRP, mutualisation, méta-heuristiques**

Résumé

Cette étude traite des défis logistiques dans les Circuits Courts Alimentaires de Proximité (CCAP), où les producteurs sont confrontés à des coûts logistiques élevés. Une nouvelle variante du problème de tournées de véhicules (VRP) est proposée, permettant aux producteurs de mutualiser leurs livraisons avec d'autres producteurs partenaires. Avec un producteur partenaire, un producteur peut soit lui déposer des marchandises pour un client (que ce producteur servira), soit prendre des marchandises pour un client qu'il visitera lui-même lors de ses tournées.

Bien que la résolution du Problème de Tournées de Véhicules (VRP) soit un domaine clé en optimisation, avec certaines variantes adaptées aux spécificités des CCAP, comme le Pickup and Delivery ou les livraisons fractionnées, peu d'études abordent un aspect de mutualisation des tournées comme celui-ci.

Trois approches heuristiques ont été testées, exploitant à la fois l'exploration aléatoire et l'intensification locale pour optimiser les tournées. Les premiers résultats montrent une réduction significative des coûts logistiques grâce à la mutualisation, tout en révélant un déséquilibre dans la répartition des charges entre producteurs.

Keywords **–Short Food Supply Chains, VRP, delivery sharing, metaheuristics**

Abstract

This study addresses the logistical challenges in Short Food Supply Chains (SFSC), where producers face high logistical costs. A new variant of the Vehicle Routing Problem (VRP) is proposed, enabling producers to share their deliveries with partner producers. With a partner producer, a producer can either drop off goods for a customer (to be served by the partner producer) or pick up goods for a customer they will visit themselves during their routes.

Although solving the Vehicle Routing Problem (VRP) is a key area in optimization, with certain variants tailored to the specificities of SFSC, such as Pickup and Delivery or split deliveries, few studies address a delivery sharing aspect like this.

Three heuristic approaches were tested, combining random exploration and local optimization to improve routing efficiency. Initial results show a significant reduction in logistical costs thanks to the sharing approach, while also highlighting an imbalance in the workload distribution between producers.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Logic-based Benders decomposition for fresh food delivery

PIERRE MONTALBANO[1], PIERRE DESPORT[1], YANNICK KERGOSIEN[1], AMEUR SOUKHAL[1]

[1] Université de Tours, LIFAT
64 avenue Jean Portalis 37200 Tours, France
{pierre.montalbano, pierre.desport, yannick.kergosien, ameur.soukhal}@univ-tours.fr

***Résumé* – En Europe, les circuits courts alimentaires sont reconnus comme une pierre angulaire de la transition vers un système alimentaire plus durable. De nouveaux acteurs émergent pour faciliter les relations entre producteurs et institutions comme les services de restauration. Ils opèrent souvent dans une zone restreinte, avec une connaissance précise des stocks, les capacités de livraison des producteurs et les besoins en produits des services de restauration. Leur rôle est d'affecter les commandes aux producteurs et de gérer leur distribution, parfois via une plateforme. Prendre de bonnes décisions dans ce contexte est une tâche complexe en raison de plusieurs contraintes comme les capacités de livraison, les échéances et la périssabilité des produits frais. Développer des outils pour résoudre ce problème permettrait une coordination locale plus efficace et durable.**

Dans cette étude, nous proposons un modèle MILP pour ce problème et une méthode exacte basée sur la décomposition logique de Benders. Pour améliorer l'efficacité de la méthode par décomposition, nous avons développé plusieurs stratégies pour accélérer la convergence. A partir d'un cas réel (Manger Bio Centre-Val de Loire), nous avons évalué notre méthode sur des instances semi-aléatoires de taille raisonnable. Les résultats montrent que notre approche est plus performante qu'une résolution du MILP par un solveur commercial.

***Mots clés* – logistique, circuit court, décomposition de Benders, méthode exacte**

***Abstract* – In Europe, short food supply chains have been recognized as a cornerstone of the transition toward a more sustainable food system. New actors emerge to facilitate the relationship between producers and institutions such as catering services. They typically operate within a restricted area, possessing detailed knowledge of producers' inventories, delivery capacities, and the catering' product requirements. Their role is to allocate orders to producers and manage the distribution, possibility via a hub if deemed advantageous. Making good decisions for this problem is a difficult task due to several constraints, including delivery capacities, due dates of customers, and perishability of fresh food. Developing tools to solve this problem would enable a more efficient and sustainable coordination between local producers and collective catering services.**

In this study, we propose a MILP model to address the problem, and develop an exact solution method based on Logic-Based Benders Decomposition. To further enhance its efficiency, we integrate various strategies aimed at accelerating the convergence of the method. Using a real-world case study (Manger Bio Centre-Val de Loire), we evaluated our approach on semi-randomly generated instances of reasonable size. The results demonstrate that our method significantly outperforms the direct resolution of the MILP using CPLEX.

***Keywords* - logistic, short supply chain, Benders decomposition, exact method**

CIGI QUALITA MOSIM 2025

Wildfire Patrol Routing for Early Detection: Dynamic Periodic Arc Routing Problem with Refill Points, Variable Intervention Times and Relaxed Priority Rule.

LISE NAKACHE [1], PIERRE FENIES [1], LIBO REN [1,2]

[1] LARGEPA, PARIS-PANTHEON-ASSAS UNIVERSITY, 1 RUE GUY DE LA BROSSE, 75005 PARIS, FRANCE
(EMAIL : {LISE.NAKACHE, PIERRE.FENIES, LIBO REN}@U-PARIS2.FR)
[2] LIMOS, UMR CNRS 6158, CLERMONT AUVERGNE UNIVERSITY, 1 RUE DE LA CHEBARDE, 63178 AUBIERE, FRANCE

Résumé

Le changement climatique intensifie et multiplie les feux de forêt à l'échelle mondiale. Les patrouilles de surveillance et d'intervention jouent un rôle crucial dans la prévention et la détection précoce des feux. En France, ces patrouilles sont principalement effectuées par l'Office National des Forêts, qui s'appuie sur les conditions météorologiques et l'expertise des agents pour planifier les tournées. Notre étude porte sur la conception d'une nouvelle approche visant à optimiser ces patrouilles en intégrant des contraintes opérationnelles réelles. Ce type de tournée est modélisé sous la forme d'un problème dynamique de tournées périodiques sur arcs incluant des points de réapprovisionnement, des temps d'intervention variables et une règle de priorité assouplie. L'approche est appliquée à un département du sud de la France, où une flotte limitée doit couvrir des zones à haut risque en fonction des prévisions météorologiques et du risque de feux. Les tournées s'ajustent dynamiquement aux alertes, ce qui nécessite une règle de priorité assouplie. Les temps d'intervention varient en fonction de la situation, tandis que les véhicules, à capacité d'eau restreinte, nécessitent des réapprovisionnements stratégiques. L'objectif est d'optimiser la couverture du territoire tout en considérant une flotte de véhicules restreinte, des contraintes de réapprovisionnement et des interventions dynamiques.

Mots-clés – Problème de tournées sur arcs, Prévention des feux de forêt, Optimisation des patrouilles de surveillance des feux de forêt, Contraintes opérationnelles

Abstract

In the context of climate change, wildfires are becoming more frequent and intense worldwide, expanding risks to previously unaffected northern regions. One of the most effective strategies for wildfire prevention and early detection is surveillance and intervention patrols. In France, these patrols are primarily conducted by the National Forest Organization relying on daily weather conditions and expert judgment to determine patrol routes. Our study focuses on designing a new approach to optimize surveillance patrols while taking into account real-world operational constraints. Surveillance and intervention patrol can be formulated as a Dynamic Periodic Arc Routing Problem with refill points, variable intervention times and a relaxed priority rule. We apply our approach to a case study conducted in a department in the South of France, where a limited fleet must cover high-risk areas based on fire risk estimations and weather conditions. Patrol routes are dynamically adjusted in response to real-time fire alerts. Vehicles have constrained water capacity, requiring strategic refills, and intervention times vary depending on the situation. While some areas are more critical, priority rules remain flexible to accommodate real-time adjustments. The objective is to maximize patrol coverage while considering fleet limitations, refill constraints, and dynamic interventions.

Keywords – Arc Routing Problem, Wildfire prevention, Wildfire patrol optimization, Operational Constraints

CIGI QUALITA MOSIM 2025

Knowledge-based approach for the soft time-consistentcapacitated vehicle routing problem

MATHIEU BOUSQUET[1 2], VERONIQUE FRANÇOIS[3], ALEXIS ROBBES[1]

[1] LIST3N, Université de Technologie de Troyes
12 rue Marie Curie, 10000 Troyes, France
alexis.robbes@utt.fr

[2] Faculté des Sciences et Techniques, Nantes Université
2 rue de la Houssinière, 44322 Nantes
mathieu.bousquet@etu.univ-nantes.fr

[3] QuantOM, HEC Liège - Management School of the University of Liège
14 rue Louvrex, 4000 Liège, Belgique
Veronique.Francois@uliege.be

***Résumé* – mettre ici le résumé en Français**

Dans le domaine économique, les entreprises cherchent à attirer et à fidéliser autant de clients que possible pour faire face à leurs concurrents. Une façon d'y parvenir est de se concentrer sur la satisfaction des clients grâce à une livraison régulière dans le temps. Cette recherche aborde le soft time-consistent vehicle routing problem. Dans cette variante, la fidélité des clients est récompensée par une meilleure régularité temporelle dans la mesure du possible, et entraîne un dédommagement financier lorsque cette régularité ne peut pas être atteinte. Notre approche détermine la fidélité des clients et ajuste leurs fenêtres horaires en fonction d'un historique de livraisons. Ce problème peut être modélisé comme un problème à deux niveaux, où le premier niveau de décision définit les fenêtres horaires pour plusieurs périodes, et le second niveau résout un CVRP avec des fenêtres temporelles souples pour chacune des périodes. Un algorithme heuristique à deux niveaux basé sur les connaissances est proposé pour résoudre le problème, et ses performances sont évaluées sur des instances numériques provenant de la littérature ainsi que sur de nouvelles instances générées.

***Abstract* – include here the abstract in English**

In the economic field, companies aim to attract and retain as many customers as possible to face their competitors. One way to achieve this is to focus on customer satisfaction through consistent delivery over time. This research addresses the soft time-consistent vehicle routing problem. In this variant, customer loyalty is rewarded with improved time consistency when possible, and leads to financial compensation otherwise. Our approach determines customer loyalty and fix their time windows based on a delivery history. This problem can be modeled as a two-stage problem, where the first decision level sets time windows for several periods, and the second level solves a CVRP with soft time windows for each period. A two-stage heuristic algorithm based on knowledge is proposed to solve the problem, and its performance is evaluated on numerical instances from the literature as well as on newly generated ones.

***Mots clés* - régularité temporelle, CVRP, fenêtres de temps souples**
***Keywords* – time consistency, CVRP, soft time windows**

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Branch-and-price approach to solve the technician routing and scheduling problem

ALA-EDDINE YAHIAOUI

Université de Technologie de Troyes, Laboratoire Informatique et Société Numérique – LIST3N
10 rue Marie Curie, 10000 Troyes, France
ala_eddine.yahiaoui@utt.fr

Résumé –

Le problème de tournées de techniciens (TRSP) est une variante des problèmes de tournées, avec des attributs supplémentaires inspirés des activités de maintenance effectuées par des techniciens. Ces attributs incluent des fenêtres temps, des dépôts multiples, des ressources renouvelables et non renouvelables, des compétences, possibilité de réapprovisionnement des ressources, etc. Nous proposons une approche de type Branch-and-Price pour résoudre ce problème de manière optimale. L'évaluation de chaque nœud de l'arborescence du B&P est obtenue par la génération de colonnes, où le sous-problème est modélisé comme un problème du plus court chemin avec contraintes de ressources. Nous avons conçu une règle de dominance adaptée au cas du TRSP afin d'identifier et puis éliminer les chemins dominés. Nous présentons également une approche méta-heuristique pour résoudre le TRSP. Les solutions générées par la méta-heuristique sont utilisées pour la construction d'un pool initial de colonnes de bonne qualité, tandis que la meilleure solution est utilisée comme une borne supérieure pour élaguer les nœuds non prometteurs durant le B&P. L'évaluation des performances des approches proposées est réalisée en se basant sur des instances de la littérature. Des tests et des résultats sont présentés, puis des pistes de recherche futures sont identifiées.

Abstract –

The Technician Routing and Scheduling Problem (TRSP) is a variant of the well-known Vehicle Routing Problem, with additional attributes and constraints inspired by the field maintenance activities carried out by skilled technicians. These attributes include time windows, multi-depot, renewable and non-renewable resources, skills, possibilities for replenishment of resources, etc. We propose a Brand-and-Price approach to solve this problem to optimality. The bounding of each node in the B&P tree is achieved by column generation, where the pricing the problem is modeled as a resource-constrained shortest path problem. We devise a dominance rule adapted to the TRSP to eliminate dominated paths since early stages. We also present a meta-heuristic approach to solve the TRSP. The solutions generated by the meta-heuristic are used to accelerate the B&P approach, on the one hand, by constructing an initial pool of columns, and on the other hand, by using the best solution as an upper bound to prune non-promising nodes during branch-and-bound tree exploration. The performance evaluation of the proposed approaches is carried out based on benchmark instances from the literature. Test and results are presented, then some insights are drawn for future research directions.

Mots clés **- Problème de Tournées de Véhicules ; Tournées de Techniciens ; Branch-and-Price ; Génération de colonnes ; Plus court chemin.**

Keywords **– Vehicle Routing Problem; Technician Routing and Scheduling; Branch-and-Price; Column Generation; Shortest Path Problem.**

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Literature review of PLM and AI in industry 5.0: preliminary contribution to proactive design for sustainability

YI MIAO TU[1], RAOUDHA GAHA[1], JULIEN LE DUIGOU[1], BERTRAND MARCONNET[12], BENOIT EYNARD[1]

[1] UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE COMPIEGNE, ROBERVAL, COMPIEGNE, FRANCE

[2] UNIVERSITE DE LYON, ECAM LASALLE, LABECAM, LYON, FRANCE

YI-MIAO.TU@UTC.FR

***Abstract* – In the context of Industry 5.0, the integration of sustainability has been particularly emphasized inside the industrial system. To address this need under today's highly competitive market, proactive design for sustainability is crucial to mitigate negative environmental impact from the preliminary design phase of a product's life cycle. This indicates that the environmental assessment will be carried out based on a forward-looking scenario, in which product information must be exploited appropriately to cope with the uncertainties that emerge. To ensure the accurate prediction of environmental impact and sustainable decision support for a product still under development, a reliable product-related information provider and data processor is required. Therefore, the integration of artificial intelligence (AI) with product lifecycle management (PLM) is regarded as a tangible approach. In the paper, a literature review of the implementation of AI technology in PLM has been presented. The benefits and challenges, including the AI application in PLM have been discussed in detail. Furthermore, the role of AI-based PLM in proactive design for sustainability scenarios is outlined. Finally, the detailed future work concludes the discussion.**

***Keywords* – Product lifecycle management, Artificial intelligence, Eco-design, proactive engineering.**

1 INTRODUCTION

Over the last decade, Industry 4.0 has been criticized as it focused more on digitalization and technologies and lacked measures to cope with principles of social fairness and sustainability. This disequilibrium between technology, humans and the environment have a negative impact in the long term. To address this long-term challenge, the transition towards Industry 5.0 is expected. According to the European Commission, "Industry 5.0 recognizes the power of industry to achieve societal goals beyond jobs and growth to become a resilient provider of prosperity by making production respect the boundaries of our planet and placing the well-being of the industry worker at the center of the production process." [European Commission, 2021]. Industry 5.0 proposes, therefore, a different focus on the synergy between human and intelligent systems while human centricity, sustainability and resilience are emphasized. The implementation of the emerging concept requires technologies aligned with sustainable development goals (SDGs) [United Nations, 2015]. In this context, the utilization of AI technologies has proven to be the most impactful, as it enhances data analysis, predictive maintenance and decision-making, which are essential for optimizing energy efficiency and operational excellence [Sharma and Gupta, 2024].

The increasing complexity of products (for example, environmental, societal, and economic plans) and associated regulations and standards make it important for industry to foresee these constraints from the early stages of product development to limit environmental impact. This phenomenon leads to a "proactive" approach to anticipate these repercussions on the product's life cycle [Marconnet et al., 2024]. Proactive design is a framework that integrates not only product knowledge but also information from life-cycle processes to anticipate environmental, technological, societal and economic constraints as early as possible in the design phase. In that case, a deep understanding of the process contexts related to the designer's intents and access to knowledge from other designers becomes important [Demoly et al., 2013]. A deep understanding of the process contexts related to the designer's intents and access to knowledge from other designers becomes important [Demoly et al., 2013]. This requires the optimization of interoperability and ensuring a digital thread to centralize data, facilitating information and knowledge exchange during the preliminary design phases of the product development [Gaha et al., 2014].

As sustainability is recognized as a cornerstone of Industry 5.0, its definition is becoming increasingly harmonized through 17 SDGs expressed by the United Nations [United Nations, 2015].

Given that 80% of environmental impacts are defined from the early process of the design phase, the integration of a design for sustainability approach is crucial to align with the sustainability strategy [Guyon et al., 2024]. A growing number of stakeholders are getting involved in the integration of environmental aspects to gain competitive advantages [Michelin, 2015]. In the meantime, the existing environmental challenge and rapidly evolving regulations are compelling manufacturers to innovate in the field of proactive design for sustainability approaches. The decisions related to sustainability should be made in the early process of the product development process, and the designers necessitate access to sustainability indicators embedded in a dynamic process of design for sustainability to anticipate sustainable decisions [Gaha et al., 2018]. Harnessing the product lifecycle management (PLM) solution embedded with a sustainable development strategy offers us a consequent path to resolve this problem. According to Le Duigou et al., PLM can be defined as follows: "A strategic business approach that applies a consistent set of business solutions in support of the collaborative creation, management, dissemination and use of product definition information across the extended enterprise from concept to end of life - integrating people, processes, business systems, and information." To better serve our purpose in the context of proactive design for sustainability, current PLM should be leveraged in terms of functionality, process modeling, and interoperability between different systems, such as computer-aided design (CAD) and enterprise resource planning (ERP) [Le Duigou et al., 2012]. Furthermore, as AI technologies have the potential to reshape the industry, the integration of emerging artificial intelligence (AI) technologies into the PLM system enhances its capacities in multiple aspects [Wang et al., 2021]. The intersection of these two paradigms is therefore worth an in-depth investigation by realizing a comprehensive literature review.

In the paper, we are going to discuss our first research work with the following question: "How can AI-integrated PLM contribute to the scenario of proactive design for sustainability?" The next section will present a state of the art on AI and PLM in Industry 5.0. Section three details our analyses on the expressed research question as well as the opportunities identified during the research review. The last section provides the conclusion and details regarding future orientation. details for the future orientation.

2 STATE OF THE ART AND RESEARCH TREND

2.1 Research approach

During our research work, we have carried out a comprehensive literature review with the objective of understanding the panorama at the intersection of AI and PLM. We have used two databases for paper collection: IEEE and Scopus. The figure below illustrates the keywords we have employed. Noting that the synonyms and acronyms of each keyword are considered.

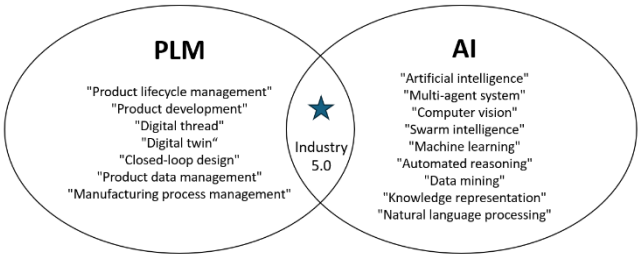


Figure 1. Keywords used during paper research

The table below outlines the filters we have applied during the screening process. As a result, 26 papers have been selected for a full-text lecture.

Inclusion	Exclusion
The paper is published between 2014-2024	Duplicate papers
The paper is a conference paper, full paper or a literature review	The paper is not relevant of our research context
The abstract, title and keywords are related to our research topic	The paper is not written in English or French
	The paper is not a reviewed research work

After analyzing the content of the filtered papers during the full-text lecture, we finally selected 14 papers that fulfill at least one out of the three listed criteria: I. The paper demonstrates the opportunities and challenges of AI application in PLM. II. The paper develops the framework of AI application in PLM or a specific PLM phase to solve PLM problems. III. The paper represents industrial implementation of AI in PLM.

2.1 Research trend

In the context of Industry 5.0, the shift from a linear economy to a circular economy emphasizes the necessity of redefining the product lifecycle and business model. Consequently, traditional concepts in the paradigm of PLM such as "cradle-to-grave," require a reconsideration [Voskuil, 2024]. This led to the identification of the first research trend of PLM based on the integration of sustainability and circularity. Following up on this trend, models like closed-loop PLM and life cycle assessment (LCA)-integrated PLM have been widely discussed. Simultaneously, the growing complexity of products, interfacing processes, value chain networks and IT environments urges current PLM solutions to implement intelligent technologies and automated data management to better support engineering activities [Stark et al., 2014]. As AI is proven to be a transformative tool that brings more influence on the evolution of Industry 5.0 compared to the other technologies [Sharma and Gupta, 2024], leveraging AI presents an opportunity to redefine the current landscape of PLM. From this perspective, the application of AI technology in the current PLM can be identified as another research trend, which will be explicitly discussed in the following sections.

2.2 Historical emergence and the role of PLM

The concept of PLM has first emerged as a successor of PDM (product data management) systems. It was first adopted in the automotive and aerospace industries in the late 1980s. Driven by the increasing complexity of product and market competition, the demand for a better product management system makes a wide range of sectors start to adopt PLM solutions to increase productivity, maximize product value, and reduce costs in their organizations. PLM enables the storage, management, and sharing of product-related information [Fielding et al. (2014)].

Barrios et al. (2022) note that the definition of PLM is nowadays well established. The academic field maintains a homogenous definition of PLM. Two aspects of PLM have been highlighted: PLM as a business strategy and PLM as an enterprise-level software application, which is the focus of PLM solution vendors. PLM can be considered a collaborative platform, integrating multiple digital tools related to the lifecycle of a product, such as CAD tools, project planning tools and manufacturing tools. The collaborative platform can directly share the data generated by these tools, fostering collaboration among various stakeholders with the support of information systems. [Terzi et al., 2010] define PLM as "a product-centric, lifecycle-oriented business model, supported by ICT (information and communication technology), in which product data are shared among actors, processes and organizations in the different phases of the product lifecycle for achieving desired performances and sustainability for the product and related services". The effective implementation of a PLM solution increases productivity in the product development process while maximizing their output [Rossi et al., 2016].

2.3 Historical review and definition of AI

The discussion of AI has been started for decades. According to Cardon, multiple schools of thought existed in this paradigm, and major schools have shifted over time. Before 1960, "connexionism" was widely accepted by researchers. This school believes AI is derived from bionics. Between 1970 and 1990, "symbolicism" became the major school, which defines "thinking" as the calculation of symbols. After the 1970s, the concept of "connexionism" has returned to its dominant position defining the principles and characteristics of AI [Cardon et al., 2018]. By the end of the 20th century, a new school "Actionism" emerged, considering that AI is derived from cybernetics [Wang et al., 2021]. [Tsirigotis et al., 2024] define AI as: "Systems imitating human intelligence to execute tasks, which can be improved by the collected data. It is the field of computer science dedicated to solving cognitive problems commonly associated with human intelligence, such as learning, pattern recognition, and problem solving". In 2021, the European Commission published a technical report including an operational definition and taxonomy of AI [European Commission, 2021].

2.4 Challenges and benefits integrating AI in PLM

As previously discussed, multiple challenges related to data and information management can be identified within PLM (e.g. the scope and complexity of PLM as a data model itself, extract and making sense of data etc.) [Stark et al., 2014]. According to [Tsirigotis et al., 2024], PLM solutions contain a large amount of data which AI technology can intervene in accessing, analyzing, and extracting meaningful insights. This technology has the potential to help overcome the challenges in PLM such as facilitating data mining and analytics. By reasonably harnessing AI technologies, organizations can easily optimize design processes, improve product performance, make data-driven decisions and elaborate product development strategies. The authors describe the application of AI in PLM in seven points: I. Prediction; II. Recommendation and decision assistance III. Automation of repetitive tasks; IV. Design process assistance; V. Quality assurance and safety; VI. Enhanced search and reuse; VII. Image recognition, including 3D parts for specific use cases. This study has exhaustively discussed the benefits and challenges of implementing AI technologies in PLM systems. The study also included various illustrative examples. However, existing research papers do not consolidate the linkage of outlined applications.

A similar discussion can be found in the work of [Wang et al.], in which the application of AI in different stages of PLM has been discussed separately throughout a research review. The new generation of PLM needs a deep integration of AI technology, as it shifts from product to service, from offline production to online collaboration, and from informatization to intellectualization. The authors have created a structured roadmap by discussing the application of AI in three separate parts of PLM: I. Product design; II. Product manufacturing; III. Product service. The sub-stages of these parts are highlighted, and based on different stages, the corresponding AI-related solutions and examples are proposed to facilitate the implementation of AI in the PLM. Apart from the same opinion as [Tsirigotis et al., 2024], the advantages that AI brings to PLM are that it helps leverage manufacturer business models: Adopting AI in PLM facilitates easy market analysis through data mining. The emphasis is on how the combination of AI and big data analytics helps manufacturers capture uncertainties. From this point of view, the integration of AI technologies in PLM enables not only the prediction of the impact of change based on stored data but also the support of various measures to anticipate future changes. The authors have also outlined the limited AI application for PLM due to the following challenges: I. Challenges in data collection and transformation: For example, the customer's requirements collected from different platforms represent a type of unstructured and fragmented data. Noting that the implementation of AI requires a large amount of high-quality data for training. II. The reliability and adaptability of AI algorithms: In some cases, an accuracy rate only reaches 90% when the target process strictly prohibits any errors. Different AI algorithms can be used alternatively for one objective, yet they are sensitive to the scenarios and data quality. III. Uncertainties and emergencies: PLM environments are full of uncertainties, affecting the quality and reliability of data. AI algorithms seem to be less performant than humans while coping with low-probability emergencies; IV. Information security and trust: AI algorithms often face risks from unknown attacks.

To summarize, few papers can be found discussing the overall challenges and opportunities in PLM-AI integration. Both of the identified studies provide valuable insights into current states in PLM-AI integration. However, the presented examples included in these papers focused on specific industrial activities and didn't highlight the case studies with application to PLM systems, which represents a significant limitation. In the following subsections, we will discuss a literature review that takes this aspect into consideration.

2.5 Applications of AI technologies in the paradigm of PLM

Since the application of AI brings significant potential for leveraging PLM towards its new generation, the related challenges exist. According to [Dekhtiar et al., 2018], in the context of smart manufacturing, information systems like closed-loop PLM tend to produce humanly unmanageable data, hindering companies from seizing opportunities like knowledge discovery, process automation, decision support systems and recommendation engines. An engineering case study has been conducted with the deep learning method in PLM to discuss the feasibility of using AI technology to solve the problem explained. The case study demonstrated that the implementation of deep learning algorithms for PLM solutions resolves data heterogeneity and assures a digital thread. It is an imagery comparison engine which can execute tasks of object classification. This method divides the workflow into several steps, including data-automated preprocessing and automated data augmentation. During automated data preprocessing, the authors have noticed that STEP files as well as STL files must be converted to image data to optimize format heterogeneity introduced by CAD models that can be optimized. As for automated data augmentation, random background properties such as textures, saturation, rotation, horizontal flip etc. are integrated to the original image. This step forces the algorithm to differentiate the background from the model so that its resistance to noisy data can be enhanced. The proposed deep learning-based approach can help tackle PLM challenges such as data heterogeneity in CAD models. Besides, the developed open-source project enables the continuous optimization and communication of the proposed model. However, it should be noticed that the proposed model only focused on coping with "object classification", which is a basic challenge of object recognition. The data preprocessing phase can also benefit from a lighter approach focusing on the 3D shape of the target model, optimizing the scalability. Future work is expected to cope with more difficult challenges such as localizing a single object in an image, identifying what and where all the parts and assemblies are in the image, tracking the identified object to its reference, and retrieving similar parts from a given user input.

In the context of the beginning of life (BOL) of PLM, where challenges exist in clearly identifying customer requirements, [Lou et al., 2020] have expressed a similar opinion on the challenge of PLM: As a large amount of data is being collected, this data needs to be analyzed to support decisions in PLM. The integration of intuitionistic fuzzy sets and electroencephalogram (EEG) data analysis is proposed to support data-driven decision-making. The data analysis of EEG data is treated with a genetic algorithm support vector machine (GA-SVM) classifier to label customer requirements with different EEG signals combined with a Kano model. While the discussed model is proven to be beneficial in identifying customers' requirements through a combination of extraction, classification and analysis of both psychological state and semantic expression, the limits should be discussed: the extraction of psychological state requires specific equipment, which can lead to additional costs and adoption problems. [Bickel et al., 2019] have discussed the changes of the BOL process brought by the AI-based assistance tool. Multiple methods of data mining have been explained in detail, including regression, classification, anomaly detection, association rule learning, clustering and summarization. The specific use case of deep learning and convolutional neural networks (CNN) on finite element simulation has been discussed. The importance of relational storage and collection of data and the analysis with expert knowledge have also been highlighted, aligning with our research context. This study demonstrates AI's ability to automate operational processes and enhance efficiency by proactively resolving issues of plausibility. The proposed method also shows us an interesting way to process unstructured product geometry data in PLM by projecting mesh nodes into a spherical surface. To conclude, both of the studies have demonstrated the feasibility of structuring data from different disciplines and automated operational processes to support the BOL phase in PLM. Nevertheless, the case studies should include actual PLM systems to better highlight the discussed effects.

In the field of agile manufacturing, [Nickpasand et al., 2024] have conducted a study of integrating machine learning in PLM systems. This study encompasses change management in PLM systems and highlights problems, such as the long duration of the engineering change process. This phenomenon is particularly evident in offshore wind turbine manufacturing. Even if all parts' information is collected and organized within the PLM system, the later product design changes can cause a break of the connection between the changed parts and the manufacturing process management (MPM) of the component. The reallocation process is often time-consuming and cost-driving, from the creation of the engineering change note to the approval of the generic product definition and generic manufacturing definition, where operations in the manufacturing process need to be specified. Hence, the authors have proposed a methodology for applying supervised machine learning, using a classification method and a basic neural network algorithm on the geometric form of a 3D product to predict and locate the design changes and help automate the later change process. The result demonstrates a high accuracy of prediction, which goes up to 90%, and a significant reduction of change process time by 40%, making the system more agile for frequent later design change cases. Compared to previous studies, the authors have discussed the case study based on an existing PLM system, "Teamcenter" implemented in the offshore wind turbine industry, outlining the realistic practice of the PLM-AI integration. Nevertheless, the digital thread and incompatibility of 3D model formats should also be optimized since JT files in Teamcenter are incompatible with the model, which is correlated to the key findings of Dekhtiar et al.'s work.

As aforesaid, applying machine learning methods shows huge potential to leverage product lifecycle management. However, [Schleibaum et al., 2020] note that there's only a little work in the literature on this topic. Their study has outlined new opportunities to harness object classification to support the product development process (PDP) in the context of PLM. Indeed, complex products often contain a large number of components, making the classification process time-consuming or even impossible to accomplish manually. The authors have proposed an optimal solution using a supervised machine learning method. Effectively, supervised machine learning models are capable of processing large amounts of data in a short time, and classification tasks can be considered as data treatment. The proposed method has been investigated in a case study with the objective of finding and reusing components by property-based searches in the framework of the Volkswagen AG group project "virtual high rack". The results indicated that model-based machine learning methods such as random forests and logistic regression outperformed instance-based machine

learning methods by comparing their p-value, and the best method has reached 85% accuracy in the classification tasks. This study provided an intuitive insight to the implementation of AI in PLM. Even though the precision is not ideal for a direct industry application regarding the previously discussed challenge of the "reliability and adaptability", higher accuracy can be expected considering the lack of training data during the research. Compared to the work of Nickpasand et al., AI's precision makes it difficult to be reliable. While various tasks in PLM can be automated by AI technologies, humans should be integrated into the process to ensure reliable output.

[Camarillo et al., 2018] proposed a methodology concerning the manufacturing problem-solving process in PLM. A knowledge management system based on case-based reasoning (CBR) is coupled with a PLM system integrated with process failure mode, effect analysis (PFMEA) and a problem-solving approach applied in industry called 8D method. CBR refers to an agent-based distributed architecture capable of identifying similar cases. Therefore, the objective of the concept is to harness CBR to analyze similar manufacturing problems which are previously solved and stored in a PLM system and help to solve unforeseen manufacturing problems. Their proof of concept uses Aras Innovator as PLM software and myCBR as a case-based reasoning (CBR) system. Their model is based on a specific multi-agent system (MAS), which is a kind of system composed of several agents (intellectual entities capable of acting independently) interacting, coordinating and collaborating with each other. The authors have integrated three types of agents: I. Individualized knowledge agent for information display to the end user; II. Topic agent which uses CBR to calculate the similarities; III. Coordination Agent which coordinates different agents and the selection of the best solution. The agents are expected to learn and adapt from new cases, enrich its case base, and automate the problem-solving process. The outcome of the case study shows the high compatibility of different manufacturing processes. Indeed, harnessing CBR under a multi-agent system coupled with PLM shows AI's ability to solve BOL problems and support decision-making in a dynamic manufacturing environment. The proposed ontology, which structures and represents product-related knowledge, is an effective way to ensure knowledge reuse. However, the utility of the model depends strongly on the useful cases already stored in the case base, which means that the model can be expected to be valuable in the long term after collecting a considerable useful case.

Another example of harnessing MAS and knowledge management can be found in [Berriche et al., 2016]'s work. The authors focused on the BOL phase (design and production) of the closed-loop product lifecycle management (C-L PLM) framework, where designers receive detailed product-related information from its whole lifecycle, such as conditions of retirement and disposal etc. The creation and exchange of data and knowledge should therefore be supported. The concept relies on the process of knowledge management by using a multi-agent system. The product knowledge, which refers to data of product status, project history, design activities and parameters will be captured and formalized into ontologies by intelligent agents ("Cognitive agents" and "Reactive agents"). Web Ontology Language format is used to support knowledge extraction, dissemination and reuse for future scenarios. The approach is finally validated based on a case study of designing a mechanical motor with a web-based shared environment providing 3 services: I. List of current projects; II. Supporting decision-making in the design process using existing knowledge; III. Repository of knowledge for continuous improvement in the design process. This study tackled the problems related to data collection and transformation during AI application in PLM and proved that AI technology can support the decision-making process in the context of PLM and streamline the collaboration between actors. The proposed methodological framework is also related to our research context, where existing sustainability knowledge should be harnessed appropriately by AI to support and optimize future design choices. Moreover, the study has given a tangible example for PLM-AI integration, which fosters knowledge collection and retrieval. Compared to Camarillo et al.'s study, this study added AI-based agents into the knowledge enrichment process for the model, enabling reliable and automatic ontology updates under human supervision.

To optimize middle of life (MOL) in PLM, [Guraksin and Ozcan., 2023] have proposed an "Ant Colony Optimization" (ACO)-based algorithm integrated with PLM for the sector of aircraft maintenance, repair and overhaul (MRO) planning. In fact, the PLM system can streamline MRO processes and provide information tracking for complex products. The authors have investigated the ACO method to cope with cost-effectiveness and operational efficiency. The proposed ACO-based algorithm uses "artificial ants" to explore different maintenance schedules and evaluate them based on multiple given criteria. The best schedules during the iteration of this step can be discovered and optimized continuously. The result of the experiment conducted proves that the proposed ACO-based algorithm performs better than the other metaheuristic algorithms, such as genetic algorithms and mixed-integer linear programming (MILP). The study shown illustrated an innovative approach to optimizing the problems in MOL in PLM, like maintenance scheduling with the AI-based continuous optimization, reducing dynamically maintenance cost and time. From this perspective, the challenge of AI's adaptability under a dynamic and changing environment can be effectively tackled. The proposed model can also be applied to complex scenarios where tradeoffs should be made with various assets by taking the time scale into account.

[Daniyan et al., 2021] have also illustrated the application of AI during the MOL phase of PLM. Their study has proven that AI capability can offer a sustainable solution by improving decision-making in maintenance activities and limiting the risk of urgent maintenance. This promotes both the product's utilization phase and its performance. The opportunity has been highlighted by using different AI technologies such as supervised and unsupervised machine learning, reinforcement learning and deep learning to empower PLM systems. The process of recognizing, classifying product information and decisions making can therefore be enabled in a complex and uncertain environment. The related case study refers to the bearing component of a railcar. Machine learning is used as the major component, which finds out the relationship between historical data and then creates a data-driven predictive model. By putting temperature data of bearings as the input of the Artificial Neural Network (ANN), the developed predictive model reaches 0.98 as the value of closeness of this value to 1, noting that this value is close to 1, indicating that the predictive model is highly performant. The output is illustrated in the form of the estimation of remaining useful life (RUL) as the support

indicator for decision-making. This study has provided a valuable insight into PLM-AI integration. Despite the proposition of the framework, this paper shared the same limit with multiple studies previously mentioned: the application of the model through PLM software has not been discussed in detail, even though, according to the authors, the model is expected to be compatible in the PLM environment.

[Han et al., 2023] have proposed an AI-based approach to tackle the challenges in remanufacturing in the context of a circular economy. In fact, uncertainties and increased dynamics of the disassembly process have shown the need to promote the current scheduling methods. By implementing a multi-agent deep reinforcement learning algorithm, disassembly profit can be maximized. The result showed the reactive response of the model to the dynamic and stochastic changes in the disassembly line within a case study on the hand pulse detector. It can be expected in the future that the model will address real remanufacturing scenarios by extending the scheduling scope towards refurbishment and reassembly operations. Combining with our findings in Guraksin and Ozcan's study, it's not difficult to find out that PLM-AI integration optimizes the scheduling tasks in MOL and EOL phases, adapting to unexpected problems and maximizing the profit from different tradeoffs. As PLM systems can connect with the other information systems, current PLM systems should support end-of-life (EOL) data management. However, a case study involving a PLM system should still be conducted to verify the compatibility of the proposed model.

In the study of [Jennings et al., 2016], machine learning is used to forecast obsolescence risk and product life cycle. The authors have noted that most life cycle forecasting methods are based on a data mining approach in information databases and do not integrate the specifications. Different problems also exist in current obsolescence forecasting and need an optimized solution. The proposed method investigated machine life cycle forecasting and obsolescence forecasting of the cell phone market. Different algorithms are tested, such as support vector machine (SVM), ANN and random forest (RF), and RF is proven to reach the highest accuracy in obsolescence risk forecasting and SVM is the most appropriate method for life cycle forecasting. At the end, the authors have noted the importance of data collection to improve AI's accuracy. Nevertheless, the proposed model can't predict the technology or innovation leap in the industry, as machine learning's prediction is based on the data of the "past". Therefore, using machine learning for prediction tasks is only viable for a stable environment, where new patterns rarely occur. But the basic objective of the model is inspiring for our research context, as risks related to environmental impact should also be anticipated.

In the context of PLM, product defect detection refers to information extraction tasks. According to [Li et al., 2024], this part depends on manual labeling from experts, which makes the process difficult to accomplish. The authors have also highlighted the failure detection of unseen defects. These limits make it important to introduce a new method, including the collection of multiple sources of data and the utilization of an aspect term extraction (ATE) module in which the semi-structured "word of mouth" is used as the training data. Text mining and aspect-level text classification are AI-based technologies, which are applied in this context to structure information from customer feedback. In fact, customer feedback represents a typical type of unstructured data; this should be appropriately collected and saved in the PLM system as the assistance data for future product development. This model optimizes the process by automatically labeling and formalizing the dispersed textual data into an exploitable form. The proposed model can also be adapted to the other text mining scenarios, such as various ISO standards, best practices, requirement lists, etc., facilitating the construction of a knowledge base.

3 CHALLENGES AND OPPORTUNITIES

Based on the literature of the related work, current AI applications in PLM focus on the classification of product data, prediction of product risks, and optimization of operational plans in PLM. The majority of reviewed papers have discussed the application of AI in the BOL phase of PLM whilst only a few papers have focused on its integration of the EOL phase. From this perspective, it's also important to draw attention to MOL and EOL phases, where lies the important drivers of leveraging sustainability. In general, only a few studies have shown a methodological framework about the integration of AI technologies into PLM. Among these studies, fewer studies have shared a valid case study with existing PLM software, which represents an important gap in the related research field.

Today, PLM systems are essential to store and manage product-related data. Companies are using connected PLM subsystems instead of an individual system to execute specific operations to optimize the digital thread throughout the product life cycle. The synergy created by integrating AI into PLM shows a promising potential, especially for data collection and automating operational processes. The discussed challenges in PLM-AI integration, such as data heterogeneity and adaptability in a dynamic environment, have been largely discussed by researchers. Therefore, applying AI technologies in the PLM system can be understood as the opportunity to leverage the current PLM system towards a new generation. In any case, as a key factor of Industry 5.0, appropriate intervention of AI technologies is inevitable, and an in-depth framework should be developed in a PLM system to adapt to the current industrial environment.

To summarize, table (1) is created below, giving an overall vision of the application of AI technologies solving PLM challenges. Inspired by the work of [Terzi et al., 2010], the discussed studies are separated into "BOL", "MOL" and "EOL". AI technologies are classified according to the taxonomy defined by the European Commission [European Commission, 2021].

Application in PLM	AI technology
BOL: Automating product classification (Image classification and comparison) in CAD models. [Dekhtiar et al., 2018] BOL: Finite element simulation: Plausibility check. [Bickel et al. 2019]	Classification (CNN)
BOL: EEG data analysis (Classification of biometric data) [Lou et al., 2020]	Classification (GA-SVM)
BOL: Recognition of 3D geometry of product to capture design change and predict manufacturing order [Nickpasand et al., 2024]	Prediction & Classification (ANN)
BOL: Classification automation for product's meta-data for reuse [Schleibaum et al., 2020]	Classification (RF, KNN, ANN etc.)

BOL: Solve recurring manufacturing problems through historical data [Camarillo et al., 2018]	Classification & Optimization (MAS & CBR)
MOL: Dynamically optimize maintenance scheduling [Guraksin and Ozcan, 2023]	Optimization (MAS & Swarm intelligence
MOL: Prediction of RUL and time to failure through temperature data [Daniyan et al., 2021]	Prediction (ANN)
EOL: Dynamic disassembly scheduling in remanufacturing process [Han et al., 2023]	Optimization (Reinforcement learning)
BOL & MOL: Obsolescence forecasting & lifecycle risks [Jennings et al., 2016]	Prediction (RF, SVM)
MOL & EOL: Product defect detection by collecting data from customer forums [Li et al.,2024]	Classification (Natural language processing & Text mining)

Table 1: Application of AI technologies solving PLM challenges

In the context of proactive design for sustainability (PADS), we must cope with two principal challenges: how to predict the future impact and how to anticipate sustainable design. The "prediction" means that the designers should understand the potential environmental impact and foresee the environmental performance of their product under development. Accurate prediction requires knowledge and historical data. As for the "anticipation", the system should provide and coordinate the specific solutions with the estimated outcome for different actors. These challenges both point out that the PLM system should be the fundamental platform, as it is ideal for information exchange and includes process management. The state of the art of PLM-AI integration represents multiple interesting features that are worth a deeper investigation to tackle these challenges. On one hand, data structuring and knowledge retrieval, prediction and the visualization of uncertainty factors through sensitivity analyses enable environmental assessment in preliminary design phase. On the other hand, the optimization of task distribution, scheduling and decision support can effectively support proactive sustainable decision making. This explains why and how PLM-AI integration contributes to the proactive design for the sustainability scenario. Based on this preliminary reflection, the interventions of AI technologies with the PLM system in the context of PADS can be described in three steps:

1. Sustainability data collection: This phase is supported by PLM, as it will connect with the other professional platforms and databases to support the activities of PADS. The collected data are often unstructured and heterogeneous; in that case, AI technologies should capture, filter, and classify exploitable data automatically and transform them into an exploitable knowledge base of PLM. Take an example of exploiting IoT data and requirements in ISO standards. The collected IoT data often exists in multiple forms, such as images, texts, and sensor logs, while ISO standards are in PDF format. AI technologies, like natural language processing and machine learning, can be applied in this case to process and analyze the data and transform it into a CSV format so that specific tools such as Neo4j can construct an exploitable knowledge graph, where the data is correctly structured and easy to be extracted. The transformed data can be served for continuous training for AI algorithms to leverage its accuracy.
2. Sustainability data assessment: In this part, data-mining methods should be correctly harnessed to cluster and compare current ongoing product datasets with similar released product datasets. Furthermore, the relationship between sustainability data and product-related data should be identified. Released product data will be used to prefill the missing data of the ongoing data set in the form of probability to reduce uncertainties of future-oriented environmental impact assessments. Once the product is released, the final value will be used to compare with the prefilled predicted value to support the continuous improvement of clustering results. Considering that the environmental impact is evaluated for products which are still under edition. The results can be treated by the previous step and stored in the database of PLM.
3. Sustainability data interpretation: The output of environmental assessment tools connected to the PLM system should be translated into a comprehensible outcome with detailed suggestions extracted from the knowledge base. Intuitive illustration of the result and decision support should be provided to help the end-user understand what will happen and what should be done next. Integrating NLP-related AI technologies could be useful for this step. The decision made, as well as the actual environmental impact on the released product, will also be transformed into knowledge by AI and stored in PLM as the continuous training material to calibrate and leverage the accuracy of the model.

4 Conclusion and Future Work

AI technologies bring new opportunities to leverage sustainability in the context of Industry 5.0. For example, previously discussed AI-powered predictive maintenance and dynamic disassembly scheduling reduce resource waste and enhance efficiency. Besides, AI's implications on sustainability have also been discussed by the researchers through specific cases in compliance checks, supply chain/production optimization, and real-time energy management [Sharma and Gupta, 2024]. These opportunities should be correctly harnessed within PLM so as to support PADS scenario. Various studies proved that AI can leverage the current challenges in PLM and foster its transition towards the next generation for Industry 5.0. Besides, the research question "Why integrating AI technologies in PLM is important and how it can contribute to the scenario of PADS?" has also been discussed in detail. Future research will focus on consolidating the proposed preliminary framework with the key findings and research gaps in this paper. For the next step, a proof-of-concept based on the scenario of PADS should be developed to validate the concept.

5 Acknowledgement

Authors would like to thank PTC company for supporting the research work under the Industrial Chair PADS - ProActive Design for Sustainability.

6 References

European Commission. (2021), Industry 5.0: Towards more sustainable, resilient and human-centric industry

Sharma, R. & Gupta, H. (2024). Harmonizing sustainability in industry 5.0 era: Transformative strategies for cleaner production and sustainable competitive advantage. Journal of Cleaner Production, 445, 141118.

Marconnet, B., Gaha, R., Assuad, C., Martinsen, K., & Eynard, B. (2024). Selecting sustainability indicators for smart product design based on industry 4.0/5.0 technologies: Analysis and proposal of a methodological framework. Proceedings of the Design Society, 4, 1369–1378.

Demoly, F., Pels, H. J. & Gomes, S. (2013). Proactive Engineering and PLM: Current Status and Research Challenges. In Product Lifecycle Management for Society (Vol. 409).

Gaha, R., Yannou, B. & Benamara, A. (2014). A new eco-design approach on CAD systems. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 15(7), 1443–1451.

United Nations (2015), Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development.

Guyon, S., Legoubé, L.-A., Terrier, P., & Rivest, L. (2024). The Role of CAD and PLM in Ecodesign: A Short Review. In Product Lifecycle Management (Volume 6) (pp. 43–77). Springer Nature Switzerland.

Michelin, F. (2015). Développement d'une méthode d'intégration de la dimension environnementale dans la relation client/fournisseur en conception : Application au domaine de la mécanique., PhD thesis in Université de Technologie de Compiègne

Gaha, R., Benamara, A. & Yannou, B. (2018). Proposition of Eco-Feature: A New CAD/PLM Data Model for an LCA Tool. In Design and Modeling of Mechanical Systems—III.

Le Duigou, J., Bernard, A., Perry, N., & Delplace, J. C. (2012). Generic PLM system for SMEs: Application to an equipment manufacturer. International Journal of Product Lifecycle Management, 6(1), 51.

Wang, L., Liu, Z., Liu, A., & Tao, F. (2021). Artificial intelligence in product lifecycle management. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 114(3–4), 771–796.

Voskuil, J. (2024). PLM and Sustainability. In J. Stark (Ed.), Product Lifecycle Management (Volume 6): Increasing the Value of PLM with Innovative New Technologies (pp. 163–194). Springer Nature Switzerland.

Stark, R., Damerau, T., Hayka, H., Neumeyer, S., & Woll, R. (2014). Intelligent Information Technologies to Enable Next Generation PLM. In Product Lifecycle Management for a Global Market (Vol. 442, pp. 485–495). Springer Berlin Heidelberg.

Fielding, E. A., McCardle, J. R., Eynard, B., Hartman, N., & Fraser, A. (2014). Product lifecycle management in design and engineering education: International perspectives. Concurrent Engineering Research and Applications, 22(2), 123–134.

Barrios, P., Danjou, C., & Eynard, B. (2022). Literature review and methodological framework for integration of IoT and PLM in manufacturing industry. Computers in Industry, 140, 103688.

Terzi, S., Bouras, A., Dutta, D., Garetti, M., & Kiritsis, D. (2010). Product lifecycle management—From its history to its new role. Int. J. of Product Lifecycle Management, 4, 360–389.

Rossi, M., Cattaneo, L., Le Duigou, J., Fugier-Garrel, S., Terzi, S., and Eynard, B. (2016). Lean Product Development and the Role of PLM. In Product Lifecycle Management for Digital Transformation of Industries (pp. 183–192). Springer International Publishing.

Cardon, D., Cointet, J.-P., & Mazières, A. (2018). La revanche des neurones: L'invention des machines inductives & la controverse de l'intelligence artificielle. Réseaux, 211(5), 173–220.

Tsirigotis, F. (2024). Artificial Intelligence & Product Lifecycle Management Systems. In Product Lifecycle Management (Volume 6) (pp. 13–26). Springer Nature Switzerland.

European Commission. Joint Research Centre. (2021). AI watch, defining artificial intelligence 2.0: Towards an operational definition and taxonomy for the AI landscape.

Dekhtiar, J., Durupt, A., Bricogne, M., Eynard, B., Rowson, H., & Kiritsis, D. (2018). Deep learning for big data applications in CAD and PLM – Research review, opportunities and case study. Computers in Industry, 100, 227–243.

Lou, S., Feng, Y., Zheng, H., Gao, Y., & Tan, J. (2020). Data-driven customer requirements discernment in the product lifecycle management via intuitionistic fuzzy sets and electroencephalogram. Journal of Intelligent Manufacturing, 31(7), 1721–1736.

Bickel, S., Spruegel, T. C., Schleich, B., & Wartzack, S. (2019). How do digital engineering and included AI based assistance tools change the product development process and the involved engineers. 2019, 2567–2576.

Nickpasand, M., Jaafari, H. E., & Gaspar, H. M. (2024). Machine learning in agile manufacturing; a usecase from offshore wind turbine product lifecycle management (PLM) system. 38(1), 26–33.

Schleibaum, S., Kehl, S., Stiefel, P. & Müller, J. P. (2020). Towards automated classification of product data based on machine learning.

Camarillo, A., Ríos, J. & Althoff, K.-D. (2018). Knowledge-based multi-agent system for manufacturing problem solving process in production plants. Journal of Manufacturing Systems, 47, 115–127.

Berriche, F. Z., Zeddini, B., Kadima, H., & Riviere, A. (2016). Closed-loop product lifecycle management based on a multi-agent system for decision making in collaborative design. Lecture Notes in Computer Science, 9983 LNAI, 540–551.

Guraksin, A. M., & Ozcan, A. (2023). ACO-based approach for integrating product lifecycle management with MRO services in aviation industry. Soft Computing, 27(1), 337–361.

Daniyan, I., Muvunzi, R., & Mpofu, K. (2021). Artificial intelligence system for enhancing product's performance during its life cycle in a railcar industry. Procedia CIRP, 98, 482–487.

Han, M., Yun, L., & Li, L. (2023). Deep reinforcement learning-based approach for dynamic disassembly scheduling of end-of-life products with stimuli-activated self-disassembly. Journal of Cleaner Production, 423.

Jennings, C., Wu, D., & Terpenny, J. (2016). Forecasting obsolescence risk and product life cycle with machine learning. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 6(9), 1428–1439.

Li, Z., Zhao, Y., Wang, Y., Liu, Z., & Pan, Y. (2024). A novel model for product defect detection based on the automatic aspect term extraction. 687–692.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
The Future of Project Management: For Sustainable Performance in a Complex Environment

THIERRY GIDEL[1], PAUL GARDINER[2], FREDERIC D'ARRENTIERES[3], CHRISTINE DIVRY[1], FABIEN SERAIDARIAN[2], PASCAL ALBERTI[1].

[1] Université de Technologie de Compiègne, laboratoire COSTECH
Centre de Recherche - CS 60 319 - 60 203 Compiègne cedex
thierry.gidel@utc.fr
christine.divry@utc.fr
pascal.alberti@utc.fr

[2] SKEMA Business School
Université Côte d'Azur, Lille, France
paul.gardiner@skema.edu
fabien.seraidarian@skema.edu

[3] Renault group – DES project managmeent
Technocentre Renault, 1 Avenue du Golf, 78000, Guyancourt, France
frederic.darrentieres@renault.com

Résumé

Cet article explore les défis contemporains du management de projet dans un environnement complexe, en mettant l'accent sur la durabilité et les transformations économiques, socio-écologiques et numériques. Il met en lumière le décalage croissant entre les cadres traditionnels du management de projet et les nouveaux défis liés à l'évolution des formes de travail, à la fragilité organisationnelle et aux impératifs de durabilité. Il s'appuie sur des ateliers menés avec la SMaP et des industriels des secteurs automobile, aéronautique et naval pour identifier les problématiques clés et proposer cinq axes de recherche pertinents. L'étude met en avant trois piliers fondamentaux pour une gestion de projet durable : la résilience face aux incertitudes, la gestion des ressources humaines dans un contexte de travail distribué et l'intégration des technologies émergentes. L'article souligne l'importance d'une approche hybride, combinant méthodes agiles et traditionnelles, pour faire face à la complexité croissante des projets. Il propose également un cadre collaboratif entre le monde académique et industriel pour développer de nouveaux outils et pratiques favorisant l'adaptabilité et la performance durable. Ce travail constitue une avancée significative pour les chercheurs et les praticiens en management de projet, en offrant une base théorique et des perspectives applicables à l'évolution des organisations.

Abstract

This article explores contemporary challenges in project management within a complex environment, emphasising sustainability and economic, socio-ecological, and digital transformations. It highlights the increasing mismatch between traditional project management frameworks and the emerging challenges posed by workforce evolution, organisational fragility, and sustainability imperatives. It draws on workshops conducted with a French project management society and industrial partners from the automotive, aerospace, and naval sectors to identify key issues and propose five relevant research directions. The study highlights three fundamental pillars of sustainable project management: resilience to uncertainty, human resource management in distributed work environments, and the integration of emerging technologies. The article underscores the importance of a hybrid approach, combining agile and traditional methods, to address increasing project complexity. It also proposes a collaborative framework between academia and industry to develop new tools and practices that enhance adaptability and sustainable performance. This work represents a significant advancement for researchers and practitioners in project management, providing both a theoretical foundation and practical perspectives to support organisational evolution.

Mots clés **– projet, transformation, résilience, complexité, collaboration.**
Keywords **– project, transformation, resilience, complexity, collaboration.**

1 PROJECT MANAGEMENT EVOLUTIONS

Project management has evolved into a strategic cornerstone for organisations navigating unprecedented digital, ecological, and economic challenges (Dahmer, 2024; Matlala et al., 2023).
It has transitioned from a tactical tool to a means of delivering organisational and national strategies, with the potential to support sustainable development goals (Midler, 2019; Sankaran et al., 2021). The adoption of agile methodologies and digital tools has become increasingly important for project success, with emerging technologies like AI poised to revolutionise the field (Dahmer, 2024).
Research indicates that project portfolio management is essential for executing sustainable organisational strategies in the digital era (Matlala et al., 2023). The relationship between strategy and project management is dynamic, with projects playing an active role in defining an organisation's relationship to its environment (Bredillet et al., 2005).
As project management continues to evolve as a transition innovation, it must adapt to meet the challenges of sustainability, requiring further research and development in digital migration and sustainable practices (Matlala et al., 2023; Sankaran et al., 2021).

Projects play a crucial role in operationalising strategic visions and navigating organisational change. The project-based firm (Gann & Salter, 2000; Whitley, 2006), project-based organisation (Hobday, 2000; Lundin et al., 2015) and post-bureaucratic organisation (Kellogg et al., 2006; Lee & Edmondson, 2017) remain useful conceptual foundations. However, more recent work has extended these ideas in light of digitalisation and agility, notably with the emergence of project societies (Lundin et al., 2015) and hybrid organisational forms that support strategic renewal (Pedersen et al., 2024) or evolving leadership models in distributed environments (Porath, 2023).
They serve as vehicles for strategy implementation, enabling companies to adapt to complex and uncertain environments (Bredillet et al., 2005; Harlé, 2022; Midler & Navarre, 2007). Strategic projects are selected based on specific criteria that align with organisational goals and are deployed throughout the product development process (Benedetto et al., 2016; Bowen, 1994; Posner & Randolph, 1988; Rosenbloom, 1996). A project-based perspective on strategic renewal allows for the analysis of deliberate and emergent strategies through the enactment of different project categories (Davies et al., 2012; Pedersen et al., 2024). Strategic management by projects (SMBP) provides an approach to tightly integrate strategic planning with implementation, focusing on maximising the throughput of strategy-fulfilling projects (White & Patton, 2001). This approach emphasises the active involvement of executives and the importance of clear metrics for evaluating and improving strategic implementation performance, ultimately contributing to sustaining a firm's competitive advantage in rapidly changing technological and business environments (White & Patton, 2001).

Project complexity has emerged as a significant challenge in modern project management, encompassing multiple dimensions, such as structural, uncertainty, novelty, dynamics, pace, social-political, and regulative aspects (De Rezende et al., 2018). The increasing complexity of projects is attributed to the growing number of stakeholders and their interconnections, which can be conceptualised as Value Transfer Functions (Langford & Huynh, 2007).
To address this complexity, researchers have developed models and frameworks to support project managers in adapting and managing their projects effectively (De Rezende et al., 2018). The MODeST model, for instance, classifies complexity elements under mission, organisation, delivery, stakeholder, and team dimensions (Maylor et al., 2008). Additionally, organisational factors impacting project management complexity have been identified, emphasising the need for project managers to understand and respond to complicated situations arising from the interconnectedness of these factors (Gurtinez & Hussein, 2014). Managing complexity aims to reduce uncertainty in project scheduling and budgeting while improving team performance (Langford & Huynh, 2007).

Amid these backdrops, the proposed academic-industrial chair, "The Future of Project Management: For Sustainable Performance in a Complex Environment," aims to redefine the paradigms of project management. This article explores the theoretical underpinnings and practical objectives of the chair, drawing insights from workshops conducted with leading industrial partners.

These developments have revealed a growing tension between strategic ambitions and operational realities in project execution. In particular, practitioners are increasingly facing difficulties related to workforce engagement, organisational rigidity, and escalating environmental uncertainty. The following section builds on industrial insights to further specify these emerging challenges and link them with existing literature (Section 2). Subsequently, it proposes three theoretical foundations for sustainable project management (Section 3). The collaborative workshop conducted with industrial practitioners, along with the associated results, is then presented (Section 4). Derived research directions are outlined (Section 5) before concluding with a discussion of future work (Section 6).

2 CHALLENGES OF PROJECT MANAGEMENT IN A COMPLEX WORLD

The challenges and complexities outlined in this section are the result of two workshops conducted in 2024 with eleven industrial practitioners from the automotive, aerospace, naval, and equipment manufacturing industries including some members and representatives of the French Society for Project Management (SMaP): a national representative of IPMA (International Project Management Association). These practitioners, all based in France, work for international companies that conduct product development with teams distributed across multiple continents. The workshops were organised by academic researchers with the objective of identifying key areas of interest for industrial stakeholders, ultimately shaping the framework for an industrial chair dedicated to the future of project management.
The discussions during these workshops led to the identification of major themes, which are introduced below (figure 1). To reinforce these insights with academic perspectives, relevant scholarly publications related to these themes were reviewed, forming the basis for the subsequent presentation of results.

Project management is increasingly confronted with a convergence of systemic tensions that challenge traditional practices and assumptions. Industrial feedback gathered through workshops and expert interviews reveals several interrelated issues that call for urgent attention.

First, there is a growing imbalance between ever-higher performance expectations, especially cost reductions and accelerated delivery, and the availability of skilled human resources. Many organisations are struggling to attract and retain young professionals, who are dissuaded by high-pressure environments, lack of autonomy, and insufficient meaning in their roles. These issues are exacerbated by organisational complexity, rigid control systems, and fragmented responsibilities.

At the same time, project teams are showing signs of declining resilience and cohesion, particularly in distributed or remote settings. Factors such as insufficient shared objectives, limited cross-functional interaction, and narrow task specialisation have weakened team dynamics. The increased reliance on geographically outsourced resources, driven by cost imperatives, further complicates coordination and commitment. This organisational fragility is particularly critical in contexts of technological or capital-intensive projects where uncertainty and change are endemic. In such environments, accurate forecasting and robust planning are increasingly difficult, yet investments remain high and strategic stakes significant.

Compounding these issues is a lack of integrated strategic vision regarding how project management capabilities, tools, and roles should evolve. While innovation efforts often focus on products and technologies ("what" to deliver), less attention is paid to the organisational "how", the frameworks, methods, and competences needed to deliver projects sustainably. Existing certification frameworks and standards (e.g. PMI, IPMA, PRINCE2) are also perceived as lagging behind current disruptions, offering limited guidance for managing complexity and change. Altogether, these challenges underscore the need for a systemic rethinking of project management approaches, placing greater emphasis on sustainability, adaptability, and human-centric practices.

2.1 Growing Complexity and Uncertainty

The modern project management landscape is characterised by complexity, rapid change, and uncertainty, necessitating a shift from traditional approaches to more adaptive strategies. Recent studies highlight the role of agility, digital platforms, and continuous learning in this shift (Aliyev, 2024; Matlala et al., 2023; Shafi, 2024), confirming and extending earlier insights from complexity theory (Cooke-Davies et al., 2007; Jaafari, 2003). Organisations face challenges such as shortened development cycles, increased stakeholder interdependencies, and evolving expectations (Shafi, 2024).
To address these issues, key themes emerge: adaptability, proactive risk management, stakeholder engagement, and continuous feedback (Shafi, 2024). The integration of modern practices like agile methodologies and digital technologies, including AI and collaborative platforms, is crucial for improving project execution and outcomes (Aliyev, 2024). Companies adopting these innovative approaches and technologies demonstrate enhanced stakeholder satisfaction, resource management, and project success rates (Aliyev, 2024). This paradigm shift in project management is essential for relevance and effectiveness in today's complex society, requiring a global effort to advance the field (Cooke-Davies et al., 2007; Jaafari, 2003).

2.2 Pressure on Human Resources

The evolving landscape of project management presents challenges and opportunities in the digital age. Organisations face difficulties in talent acquisition and retention, as younger generations prioritise meaning, autonomy, and work-life balance (Henkel & Haley, 2020).
The rise of distributed teams introduces complexities related to cultural diversity and remote collaboration (Mohota, 2023). To address these issues, companies must adapt their engagement strategies and foster inclusive team environments (Thamhain, 2013). Digital technologies like AI and ML are reshaping project management practices, enhancing decision-making and efficiency (Adeniran et al., 2024).
However, the rapid pace of technological change requires continuous skill development and adaptation to new tools (Adeniran et al., 2024). Effective leadership in global project environments involves focusing on common values and goals, recognising cultural differences, and building partnerships among international collaborators (Thamhain, 2013). Embracing these changes and leveraging digital tools are crucial for successful project outcomes in an increasingly digital world (Adeniran et al., 2024).

2.3 Continuous Project Streams

Modern organisations face the challenge of managing multiple concurrent projects, necessitating robust frameworks for prioritisation, resource allocation, and knowledge management (Dooley et al., 2005; Manyombe & Azondékon, 2019). This shift requires adaptive methodologies that integrate agility and cross-functional collaboration to maintain competitiveness in a fast-evolving landscape (Mood, 2024). A hybrid approach combining Agile and Kanban methodologies, enhanced by artificial intelligence for real-time feedback and dynamic task prioritisation, offers a promising solution to workflow inefficiencies and resource conflicts (Mood, 2024). Additionally, organisations are experiencing a transformation in managerial roles, with the emergence of agile and networked leadership structures allowing for greater flexibility and responsiveness (Porath, 2023). Digital transformation plays a critical role in shaping these changes, enabling more efficient decision-making and resource allocation (Porath, 2023). However, organisations must balance centralised control with localised adaptation to navigate the challenges posed by globalisation (Porath, 2023).

3 THEORETICAL FOUNDATIONS FOR SUSTAINABLE PROJECT MANAGEMENT

The three theoretical themes presented below result from a comprehensive bibliographic analysis (figure 1). These themes highlight the key research domains associated with the challenges and needs identified by industrial practitioners. These theoretical foundations will inform the preparation of the vision and objectives of the chair (5.1) as well as guide the technological research efforts structured into strategic research axes (5.2).

3.1 *Resilience and Robustness*

Project resilience is a crucial concept in modern project management, involving the ability to maintain performance through flexible and context-specific approaches when faced with disruptions (Rahi, 2019). It encompasses two key dimensions: awareness and adaptive capacity. Team resilience, influenced by individual resilience, team resources, interactions, and organisational practices, significantly impacts team performance (Hamsal et al., 2022).

Developing resilient project management strategies requires focusing on ten crucial themes, including adaptability, proactive risk management, stakeholder engagement, scenario planning, team cohesion, transparent communication, learning orientation, psychological safety, distributed leadership, and contextual awareness (Shafi, 2024). These strategies enable organisations to anticipate challenges, minimise crises, and thrive amid complexity. Transformational leadership plays a vital role in fostering both individual and team resilience (Dwidienawati et al., 2022). By implementing these resilience-building approaches, project teams can effectively navigate uncertainties, maintain stability, and achieve successful outcomes in dynamic environments.

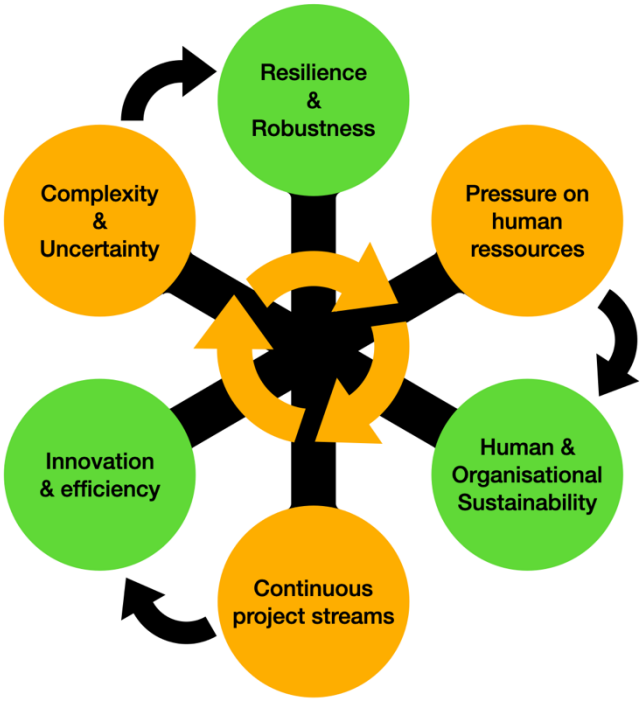


Figure 1. Contextual challenges (orange) and foundational pillars (green) shaping future project management research

3.2 *Sustainability in Human and Organisational Contexts*

Sustainability in project management extends beyond environmental concerns to encompass the well-being of project teams and organisations. Research highlights the importance of preventing burnout and attrition by fostering sustainable project environments (Govindaras et al., 2023). This involves focusing on resource management, team development, ability to act and effective communication (Govindaras et al., 2023; Silvius & Schipper, 2014).

The integration of sustainability principles into project management is gaining traction, with emphasis on environmental responsibility, social equity, and economic viability (Orieno et al., 2025). However, challenges persist, including a lack of standardised guidelines and resistance to change (Orieno et al., 2025).

The human factor in sustainability is often overlooked, despite the significant evidence of the organisational impact on burnout, stress, and attrition (Govindaras et al., 2023; Orieno et al., 2025). These recent findings update and reinforce earlier observations (Pfeffer, 2010) on the health consequences of unsustainable workplace practices. To address these issues, project managers must adopt a holistic approach, balancing environmental, social, and economic considerations throughout the project lifecycle (Orieno et al., 2025; Silvius & Schipper, 2014).

3.3 *Innovation and Efficiency*

Innovation and efficiency in project management are crucial for competitive advantage. Artificial Intelligence (AI) significantly enhances project efficiency by reducing timelines, improving cost control, optimising resources, and facilitating proactive risk management (Hossain et al., 2024).

However, successful innovation requires well-organised projects tailored to specific situations and organisations (Shenhar & Dvir, 2007). While traditional project management methods may seem incompatible with innovation, recent research shows that combining them with AI-supported approaches can enhance adaptability, speed, and risk control (Hossain et al., 2024; Tawfik et al., 2020). Finding the right fit between project characteristics and management approaches remains essential (Ciric et al., 2016; Gidel & d'Arrentières, 2023). Innovation project management calls for new tools, perceptions, and metrics to manage projects effectively, with AI playing a crucial role in facilitating innovative processes (Tawfik et al., 2020).

Despite challenges such as initial investment and resistance to change, integrating AI and innovative project management practices can lead to enhanced project outcomes and long-term competitiveness (Hossain et al., 2024; Tawfik et al., 2020).

4 Results From Industrial Workshops

The insights presented in this section are derived from two industrial workshops conducted in 2024. The eleven participants are experienced project management practitioners, either directly involved in project execution or engaged in Project Management Offices (PMOs) within their companies.

The workshops were organised by six academic researchers, who collaborated with one of the industrial stakeholders to conduct a preparatory study prior to the first session. This preparatory work led to the development of an initial framing document, which was shared with participants in advance to guide discussions.

During the first workshop, after presenting this preliminary work and introducing the participants, a brainstorming session was conducted to identify the key concerns, challenges, and issues encountered in project-related activities. A total of 191 Post-it notes were collected, categorised into thematic areas, and synthesised into a three-page report along with a formal presentation prepared by the academic team. These materials were then used by the industrial participants to present findings within their companies and gather feedback from their colleagues.

The insights gained were incorporated into the second workshop, where participants refined the emerging themes, vision, objectives, and research axes, ultimately shaping the framework presented in the following sections.

To ensure a robust theoretical grounding, a comprehensive literature review was conducted to align these industrial concerns with existing academic research, thereby structuring the research agenda for the proposed chair.
Workshops with industrial partners revealed three critical needs:
- Resilience & robustness: Strategies for managing unpredictability in supply chains and markets.
- Human and Organisational Sustainability: Attracting and retaining talent through meaningful roles and career progression opportunities.
- Innovation & efficiency: Accelerating the deployment of digital tools and AI to support decision-making and collaboration.
These three foundational pillars, identified through the workshops and supported by literature, form the conceptual basis for the five strategic research axes presented in the following section.

5 Proposal for the Chair Research Axes

5.1 Vision and Objectives

The chair aims to foster collaboration between industry and academia to address real-world challenges by producing scientific knowledge that can be practically applied. Industrial partners seek to leverage this initiative to develop innovative frameworks and tools that:
- Enhance the resilience and sustainability of project management practices and organisations supporting projects.
- Equip future project managers with the skills and mindsets needed to navigate complex environments effectively.

5.2 Strategic Axes of Research Growing Complexity and Uncertainty

To reinforce the internal coherence of the research agenda, Figure 2 presents a visual mapping between the three foundational pillars identified in the theoretical analysis and the five strategic research axes co-developed with industry partners. Each axis addresses key challenges related to resilience and robustness, sustainability in human and organisational contexts, and innovation and efficiency. This mapping underscores how the chair's research efforts are directly grounded in both academic perspectives and real-world concerns expressed by practitioners during the workshops.

5.2.1 Sustainable Performance of project management:
Challenges: Establishing robust performance metrics for sustainable project management while identifying key levers that influence both environmental and social dimensions.
Research Focus:
- Investigate the mechanisms that foster or hinder sustainable performance, with a particular emphasis on the role of diversity in creating resilient, high-performing teams.
- Assess the impact of diversity on sustainability benchmarks and analyse how inclusive decision-making and leadership styles contribute to long-term project success.

5.2.2 Teams of Tomorrow:
Challenges: Designing high-performance project teams that effectively leverage talent diversity and foster inclusion within distributed, non-hierarchical structures.
Research Focus:
- Examine the influence of team diversity on structural dynamics and performance in extended project ecosystems.
- Identify and evaluate best practices for talent acquisition, integration, and management in increasingly diverse and dynamic project environments.

5.2.3 Collaboration and Emerging Technologies:
Challenges: Utilising AI, data analytics, and immersive collaboration tools to enhance teamwork and detect weak signals in complex project environments.
Research Focus:
- Analyse the role of technological platforms in enhancing real-time collaboration, analytical capabilities and decision-making.
- Investigate how digital tools improve project alignment, onboarding, and engagement across remote and virtual teams.

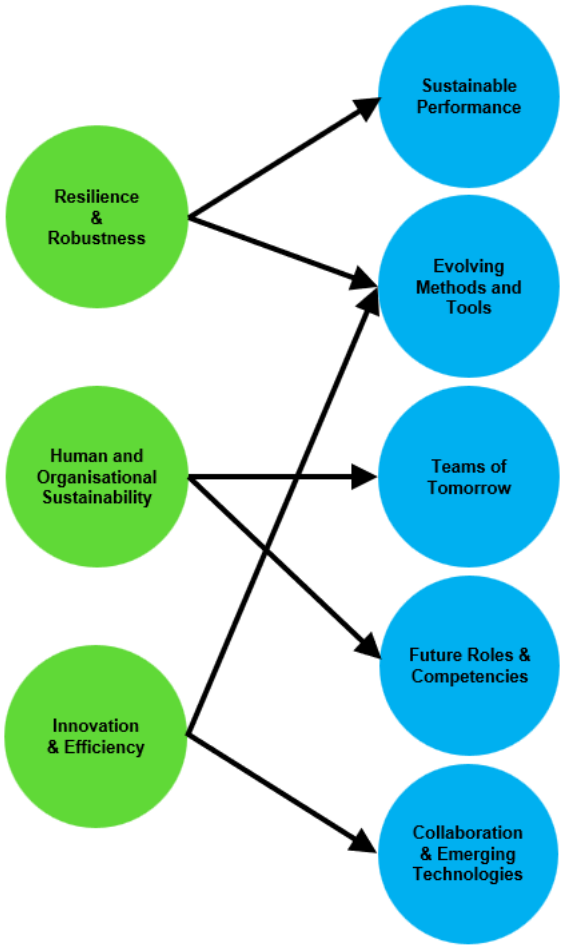


Figure 2. Linking pillars to research axes

5.2.4 Evolving Project Methods and Tools:
Challenges: Adapting traditional and agile project methodologies to be more inclusive, accessible, and adaptable to hybrid and remote work settings.
Research Focus:
- Compare and contrast traditional, agile, and hybrid methodologies across various project contexts to determine adaptability and effectiveness.
- Explore how diverse team compositions shape the evolution of project management methodologies, ensuring inclusivity and user-friendliness
- Question the conditions under which autonomy ensure higher understanding of organisational contexts

5.2.5 Future Project Roles and Competencies:
Challenges: Redefining project management roles and competencies to align with the evolving nature of work and organisational transformations.

Research Focus:
- Assess the impact of role diversity within project teams, particularly within PMOs, on overall project success.
- Define emerging competencies required in future project environments, emphasising interdisciplinary skills and transformation management to enhance best practices.

5.3 Collaborative Framework

The chair will bring together two academic institutions: an engineering school and a business school, alongside industrial partners from diverse sectors. This multidisciplinary approach ensures a holistic perspective on the challenges and opportunities in project management.

6 Conclusion and Next Steps

The challenges facing project management today demand a paradigm shift. This research has addressed this need by providing a comprehensive state-of-the-art review of current project management challenges, deriving key theoretical research areas, and translating these into five actionable research axes validated by industry practitioners:
1. Sustainable Performance of project management,
2. Teams of Tomorrow,
3. Collaboration and Emerging Technologies,
4. Evolving Project Methods and Tools, and
5. Future Project Roles and Competencies.

By integrating insights from industrial workshops with academic research, this article seeks to pioneer solutions that enhance resilience, sustainability, and innovation in project management.

Achieving these goals requires focused research across all five identified axes. This research, coupled with ongoing industrial collaboration, will enable the development of innovative organisational frameworks, methods, and tools, including: Organisational Innovation (exploring new project team configurations), Human-Centric Project Management (addressing workforce evolution and diversity), Technological Enablement (leveraging AI and digital collaboration tools), and Hybrid Methodologies (combining agile and traditional practices).

These advancements will drive the evolution of management practices and project-supporting organisations, ultimately equipping future project managers with the skills and mindsets needed to navigate complex environments effectively.

These directions directly respond to the tensions expressed by industrial practitioners, including declining team resilience, growing challenges in talent attraction, and the perceived obsolescence of existing project management standards in the face of complex and dynamic environments.

Future work will focus on formalising the chair's research agenda and expanding its network of partners. This collaborative endeavour represents a critical step toward shaping the future of project management, ensuring it remains a driver of sustainable performance in an increasingly complex world.

7 References

Adeniran, I., Agu, E., Efunniyi, C., Osundare, O., & Iriogbe, H. (2024). The future of project management in the digital age: Trends, challenges, and opportunities. Engineering Science & Technology Journal, 5, 2632–2648. https://doi.org/10.51594/estj.v5i8.1516

Aliyev, A. (2024). Evolving Approaches to Project Management Traditional Vs. Modern Practices and Technology in Europe. PAHTEI-Procedings of Azerbaijan High Technical Educational Institutions, 47, 16–28. https://doi.org/10.36962/PAHTEI47122024-02

Benedetto, H., Bernardes, M. M. S., & Vieira, D. R. (2016). Guidelines for the Deployment of Criteria for Selection of Strategic Projects in Design. The Journal of Modern Project Management. https://www.semanticscholar.org/paper/Guidelines-for-the-Deployment-of-Criteria-for-of-in-Benedetto-Bernardes/2a4f3a03b96754ba78e86d9c5db1c0fe5863c940

Bowen, H. K. (1994). The perpetual enterprise machine: Seven keys to corporate renewal through successful product and process development. Oxford University Press, USA. https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=d0LnCwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP10&dq=Bowen,+K.,+Clark,+K.,+Holloway,+C.,+and+Wheelwright,+S.+(1994).+The+perpetual+enterprise+machine:+Seven+keys+to+corporate+renewal+through+successful+product+and+process+development.+Oxford:+Oxford+University+Press.&ots=2kQAhnXo4P&sig=bCbt_TScuXGb3YpkBI77o1h64E0

Bredillet, C., Thiry, M., & Deguire, M. (2005). Enacting strategy through projects: An archetypal approach. Science & Engineering Faculty. https://www.semanticscholar.org/paper/Enacting-strategy-through-projects-%3A-an-archetypal-Bredillet-Thiry/26257ee46c5dcfc5af9118424c07c45926c931fd

Ciric, D., Lalic, B., & Gracanin, D. (2016). Managing Innovation: Are Project Management Methods Enemies or Allies. International Journal of Industrial Engineering and Management, 7, 31–41. https://doi.org/10.24867/IJIEM-2016-1-105

Cooke-Davies, T., Cicmil, S., Crawford, L., & Richardson, K. (2007). We're not in Kansas Anymore, Toto: Mapping the Strange Landscape of Complexity Theory, and Its Relationship to Project Management. Project Management Journal. https://doi.org/10.1177/875697280703800206

Dahmer, L. (2024). Navigating project management in the digital transformation era. International Seven Journal of Multidisciplinary, 3. https://doi.org/10.56238/isevmjv3n5-008

Davies, N. B., Krebs, J. R., & West, S. A. (2012). An Introduction to Behavioural Ecology. John Wiley & Sons.

De Rezende, L. B., Blackwell, P., & Pessanha Gonçalves, M. D. (2018). Research Focuses, Trends, and Major Findings on Project Complexity: A Bibliometric Network Analysis of 50 Years of Project Complexity Research. Project Management Journal, 49(1), 42–56. https://doi.org/10.1177/875697281804900104

Dooley, L., Lupton, G., & O'Sullivan, D. (2005). Multiple Project Management: A Modern Competitive Necessity. Journal of Manufacturing Technology Management, 16, 466–482. https://doi.org/10.1108/17410380510600464

Dwidienawati, D., Ichsan, M., & Syahchari, D. H. (2022, June 11). How Transformational Leadership influences Individual Resilience and Team Resilience in Project Management. 7th North American International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. https://doi.org/10.46254/NA07.20220429

Gann, D. M., & Salter, A. J. (2000). Innovation in project-based, service-enhanced firms: The construction of complex products and systems. Research Policy, 29(7–8), 955–972.

Gidel, T., & d'Arrentières, F. (2023). L'autonomie: Un concept support au déploiement des méthodes de management de projet hybrides dans les projets industriels?. Proceedings of 16th CIGI QUALITA Conférence internationale de Génie Industriel, 14-16/6/2023. Proceedings of 16th CIGI QUALITA Conférence internationale de Génie Industriel, 14-16/6/2023, Trois-Rivières, Canada.

Govindaras, B., Wern, T. S., Kaur, S., Haslin, I. A., & Ramasamy, R. K. (2023). Sustainable Environment to Prevent Burnout and Attrition in Project Management. Sustainability, 15(3), Article 3. https://doi.org/10.3390/su15032364

Gurtinez, C., & Hussein, B. A. (2014). An extended literature review of organizational factors impacting project management complexity. https://www.semanticscholar.org/paper/An-extended-literature-review-of-organizational-Gurtinez-Hussein/0339b82374d1d311f2b7c56d7d287f04c13e1bbe

Hamsal, M., Dwidienawati, D., Ichsan, M., Syamil, A., & Trigunarsyah, B. (2022). Multi-Perspective Approach to Building Team Resilience in Project Management-A Case Study in Indonesia. Sustainability, 14. https://doi.org/10.3390/su142013137

Harlé, H. (2022). L'usine conceptrice de son patrimoine de création: Modèle, organisation et méthodes pour la régénération d'un système de règles industriel [These de doctorat, Université Paris sciences et lettres]. https://theses.fr/2022UPSLM105

Henkel, T., & Haley, G. (2020). Analyzing Critical Factors: Motivating Project Managers. The Journal of Modern Project Management, 8(2), 108–121. https://doi.org/10.19255/JMPM02409

Hobday, M. (2000). The project-based organisation: An ideal form for managing complex products and systems? Research Policy, 29(7–8), 871–893.

Hossain, M. Z., Hasan, L., Dewan, M. A., & Monira, N. A. (2024). The Impact of Artificial Intelligence on Project Management Efficiency. International Journal of Management Information Systems and Data Science, 1(05), Article 05. https://doi.org/10.62304/ijmisds.v1i05.211

Jaafari, A. (2003). Project Management in the Age of Complexity and Change. Project Management Journal, 34, 47–57. https://doi.org/10.1177/875697280303400407

Kellogg, K. C., Orlikowski, W. J., & Yates, J. (2006). Life in the Trading Zone: Structuring Coordination Across Boundaries in Postbureaucratic Organizations. Organization Science, 17(1), 22–44. https://doi.org/10.1287/orsc.1050.0157

Langford, G., & Huynh, T. (2007). A Methodology for Managing Complexity.

Lee, M. Y., & Edmondson, A. C. (2017). Self-managing organizations: Exploring the limits of less-hierarchical organizing. Research in Organizational Behavior, 37, 35–58. https://doi.org/10.1016/j.riob.2017.10.002

Lundin, R. A., Arvidsson, N., Brady, T., Ekstedt, E., Midler, C., & Sydow, J. (2015). Managing and Working in Project Society: Institutional Challenges of Temporary Organizations. Cambridge University Press.

Manyombe, C. É., & Azondékon, S. H. (2019). Management Organizational Complexity in the Background Multi-Projects. Strategic Management Quarterly, 7(2), 1–9. https://doi.org/10.15640/smq.v7n2a1

Matlala, H., Nel, H., & Pretorius, J. H. C. (2023, September 12). Project Portfolio Management in the Digital Era for Organizational Strategy Execution and Sustainable Development. 4th Asia Pacific International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. https://doi.org/10.46254/AP04.20230120

Maylor, H., Vidgen, R., & Carver, S. (2008). Managerial Complexity in Project-Based Operations: A Grounded Model and Its Implications for Practice. Project Management Journal, 39(1_suppl), S15–S26. https://doi.org/10.1002/pmj.20057

Midler, C. (2019). Projectification: The forgotten variable in the internationalization of firms' innovation processes? International Journal of Managing Projects in Business, 12(3), 545–564. https://doi.org/10.1108/IJMPB-07-2018-0126

Midler, C., & Navarre, C. (2007). Project Management in the Automotive Industry (pp. 1368–1388). https://doi.org/10.1002/9780470172391.ch55

Mohota, V. S. (2023). Contemporary Issues in Project Management: The Burj Khalifa Project. IJFMR - International Journal For Multidisciplinary Research, 5(6). https://doi.org/10.36948/ijfmr.2023.v05i06.9638

Mood, S. (2024). Hybrid Agile-Kanban frameworks for workflow adaptability: A proposed solution for innovation in project management. World Journal of Advanced Research and Reviews, 24, 2454–2467. https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.24.2.3626

Orieno, O., Ndubuisi, N., Eyo-Udo, N., Ilojianya, V., & Biu, P. (2025). Sustainability in project management: A comprehensive review. World Journal of Advanced Research and Reviews, 656–677. https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.21.1.0060

Pedersen, C., Ritter, T., & Andersen, T. (2024). A Project-based Perspective on Strategic Renewal. Strategic Management Review, 5, 241–271. https://doi.org/10.1561/111.00000069

Pfeffer, J. (2010). Building Sustainable Organizations: The Human Factor. Academy of Management Perspectives, 24(1), 34–45. https://doi.org/10.5465/amp.24.1.34

Porath, U. (2023). Advancing Managerial Evolution and Resource Management in Contemporary Business Landscapes. Modern Economy, 14, 1404–1420. https://doi.org/10.4236/me.2023.1410072

Posner, B. Z., & Randolph, W. A. (1988). What every manager needs to know about project management. https://scholarcommons.scu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1002&context=mgmt

Rahi, K. (2019). Project resilience: A conceptual framework. International Journal of Information Systems and Project Management, 7, 69–83. https://doi.org/10.12821/ijispm070104

Rosenbloom, R. S. (1996). Engines of innovation: US industrial research at the end of an era. Harvard Business School Press. https://www.fulcrum.org/concern/monographs/zp38wc69f

Sankaran, S., Jacobsson, M., & Blomquist, T. (2021). The history and future of projects as a transition innovation: Towards a sustainable project management framework. Systems Research and Behavioral Science, 38(5), 696–714. https://doi.org/10.1002/sres.2814

Shafi, M. T. (2024). Developing Resilient Project Management Strategies for Adapting to Uncertain Environments. International Journal of Science and Research (IJSR), 13(10), 2017–2030. https://doi.org/10.21275/SR241029123602

Shenhar, A., & Dvir, D. (2007). The Lost Link: Why Successful Innovation Needs Sound Project Management (p. 610). https://doi.org/10.1109/PICMET.2007.4349375

Silvius, A. J. G., & Schipper, R. P. J. (2014). Sustainability in

project management: A literature review and impact analysis. Social Business, 4. https://doi.org/10.1362/204440814X13948909253866

Tawfik, T., Almaazmi, J., & Omran, A. (2020). How Organization Will Enhance Benefits Realization by Using Innovation Project Managment and AI (Artificial Intilligence). 103. https://doi.org/10.3311/CCC2020-027

Thamhain, H. J. (2013). Changing Dynamics of Team Leadership in Global Project Environments. American Journal of Industrial and Business Management, 3(2), Article 2. https://doi.org/10.4236/ajibm.2013.32020

White, D. E., & Patton, J. R. (2001). Closing the strategic vision/implementation gap for competitive advantage. PICMET '01. Portland International Conference on Management of Engineering and Technology. Proceedings Vol.1: Book of Summaries (IEEE Cat. No.01CH37199), 1, 15 vols1-. https://doi.org/10.1109/PICMET.2001.951710

Whitley, R. (2006). Project-based firms: New organizational form or variations on a theme? Industrial and Corporate Change, 15(1), 77–99.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Adapter la variété des modules pour maîtriser la complexité face à l'individualisation de masse : un cadre décisionnel

MARC-ANTOINE ROY[1], GEORGES ABDUL-NOUR[1]

[1]UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES
3351 boul. des Forges, Trois-Rivières, Canada, G9A 5H7
marc-antoine.roy@uqtr.ca; georges.abdul-nour@uqtr.ca.

***Résumé* – L'arrivée de l'Industrie 4.0 permet une transition vers l'individualisation de masse, offrant ainsi des produits uniques à un coût comparable à celui de la production de masse. Cependant, cette transition requiert une maîtrise plus rigoureuse de la complexité afin de demeurer compétitif. Bien que la conception modulaire soit reconnue comme un moyen de réduire la complexité, son application organique peut limiter les bénéfices en l'absence d'une orientation claire. L'une des façons de proposer des produits uniques tout en utilisant la conception modulaire est d'intégrer des modules uniques en plus des modules configurables et des modules standards. La littérature ne propose pas de cadre décisionnel clair pour sélectionner le type de module adéquat et ainsi contrôler la variété dans le contexte de l'individualisation de masse. Cet article propose un cadre décisionnel visant à établir un objectif de modularité pour guider le niveau de variété de chacun des modules. Une application sur un cas de vélo électrique permet de tester le modèle proposé. Son application permet de limiter l'augmentation de la complexité interne tout en répondant aux besoins clients.**

***Abstract* – The emergence of Industry 4.0 is driving a shift to mass individualization, delivering unique products at costs comparable to mass production. This shift demands more rigorous control of growing complexity to remain competitive. Although modular design is recognized for mitigating complexity, its organic application can limit benefits without clear guidance. One way to offer unique products using modular design is to combine unique modules with configurable and standard ones. Yet the literature lacks a clear decision-making framework for selecting the appropriate module type to limit the increase in variety. This article introduces such a framework, defining a modularity target that guides the variety level of each module. A case study on an electric bicycle tests the proposed model, demonstrating that it controls internal complexity while meeting customer needs.**

***Mots-clés* – Individualisation de masse, Conception modulaire, Objectifs de modularité, Gestion de la complexité, Type de modules.**
***Keywords* – Mass Individualisation, Modular Design, Modular Objectives, Complexity Management, Modularity Target.**

1 INTRODUCTION

Les besoins clients évoluent vers des produits uniques à un coût similaire à celui de la production de masse (Wang et al., 2017). Dans cette optique, l'individualisation de masse émerge comme un prolongement de la personnalisation de masse en introduisant des produits uniques et personnalisés pour chaque client (Wang et al., 2017). Dans ce contexte, gérer une variété externe accrue génère simultanément une complexité interne difficile à maîtriser avec les méthodes actuelles (Rincon-Guevara et al., 2020; Schuh et al., 2021).

Dans le présent article, le terme complexité renvoie à l'ensemble des incertitudes et impacts causés par une plus grande variété de produits (Hu et al., 2008). Cette variété se répercute sur l'ensemble des processus, notamment par : davantage de configurations, une perte de pouvoir de négociation aux achats, une planification et fabrication plus difficile à contrôler, entraînant une hausse des coûts et une perte de transparence organisationnelle (Greve et al., 2020; Hu et al., 2008).

Le développement et la production de produits individualisés deviennent de plus en plus difficiles (Bogner et al., 2017). Dans ce contexte, la conception modulaire est reconnue comme un concept clé pour maîtriser la complexité, contrôler les coûts et offrir de la flexibilité de produits (Rincon-Guevara et al., 2020; Salvador et al., 2020). Les recherches précédentes du programme dans lequel s'inscrit cette recherche ont démontré les bénéfices de la conception modulaire sur la complexité et la productivité. Cependant, les recherches précédentes montrent que les objectifs de modularité pour chaque module étaient établis de manière organique, non documentée. Ces objectifs ont été communiqués tardivement dans le processus de développement et basés uniquement selon le jugement du département de l'ingénierie (Abdulnour et al., 2022; Bouchard et al., 2022; Roy et al., 2023). Ces recherches réalisées principalement en petites et moyennes entreprises (PME) présentent l'intégration de la conception modulaire dans un contexte de ressources limitées orientant cet article vers des méthodes simples. Pour combler la problématique soulevée, la littérature ne fournit pas d'outils visant à déterminer quels modules doivent demeurer standards, lesquels doivent être configurables et lesquels exigent une individualisation complète. Les stratégies actuelles de l'individualisation de

masse se réduisent aux stratégies de personnalisation de masse (Bogner et al., 2017).
L'objectif de l'article est de proposer un cadre décisionnel pour établir des objectifs de modularité et ainsi guider la sélection du type de module approprié (standard, configurable ou unique). Ce cadre permettra de répondre aux exigences grandissantes de variété tout en visant à contrôler l'augmentation de la complexité dans un contexte d'entreprises ayant un nombre de ressources limitées.
Cet article s'inscrit dans un programme de recherche l'objectif global est de développer une stratégie de développement de produits complexes adaptée à l'individualisation de masse. La suite de l'article est organisée comme suit : (2) Revue de la littérature, (3) Méthodologie, (4) Présentation du cadre de décision, (5) Résultats de l'application sur un cas de vélo électrique, (6) Analyse, (7) Conclusion.

2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 Personnalisation de masse à l'individualisation de masse

La personnalisation de masse repose sur l'assemblage de produits préconfigurés, ce qui permet de proposer plusieurs options tout en limitant la complexité interne du produit, le tout au prix de la production de masse (Bouchard et al., 2023). Toutefois, l'individualisation de masse pousse cette logique plus loin. Le client cocrée certaines fonctions afin de rendre le produit unique (Hsiao and Chiu, 2014; Wang et al., 2017). Cette évolution augmente la variété externe, soit l'offre produit, par une configuration entièrement personnalisée (Medini, 2015; Schuh et al., 2021). L'augmentation de la variété externe accroît la variété interne, c'est-à-dire le nombre de pièces et d'assemblages pour couvrir l'offre produit complète, impactant fortement la complexité (Rincon-Guevara et al., 2020; Schuh et al., 2021). Dans ce contexte, les entreprises peuvent se demander : jusqu'où personnaliser les produits pour satisfaire le client tout en demeurant compétitif face au marché ?

2.2 Conception modulaire et complexité

Pour limiter la complexité associée à cette hausse de la variété, la conception modulaire constitue l'une des solutions clés (Rincon-Guevara et al., 2020; Salvador et al., 2020). La conception modulaire facilite la réutilisation de composants et permet la configuration par la segmentation du produit et par la réduction des interfaces (Magnusson and Pasche, 2014; Pakkanen et al., 2020). Ce principe est fondé sur le découplage fonctionnel et les interfaces standardisées (Hvam et al., 2017; Jacobs et al., 2007). Les entreprises peuvent ainsi générer un éventail de variants de produits tout en conservant une plateforme commune (Viero et al., 2015). La conception modulaire repose sur la mise en place d'une architecture modulaire. Cette architecture requiert de déterminer quels modules du produit peuvent être standardisés et lesquels ont besoin d'offrir une personnalisation pour apporter une valeur réelle (Pakkanen et al., 2019). L'architecture modulaire et le niveau de variété doivent aussi s'aligner avec la stratégie globale de l'entreprise et le niveau de différenciation visé.

2.3 Types de modules

Dans la perspective de l'individualisation de masse, la littérature distingue différentes catégories de modules qui peuvent être regroupées sous trois catégories (Du et al., 2001; Pakkanen et al., 2020; Wee and Aurisicchio, 2018).

2.3.1 Modules standards

Le module standard regroupe les fonctionnalités inchangées d'une version de produit à l'autre. Ce type de module garantit des économies d'échelle tout en assurant une stabilité technique dans le processus de production. Les modules standards se retrouvent généralement dans la plateforme du produit.

2.3.2 Modules configurables

Les modules configurables sont développés à partir d'options préétablies, tels qu'un choix de couleur, de performance ou de fonctionnalités. Ce type de module offre un compromis entre diversité des produits et maîtrise des coûts. Selon les pièces nécessitant de varier, une grande majorité des pièces peuvent être stables, amenant ainsi la notion de modules partiellement configurables. Le niveau de configuration peut ainsi varier à l'intérieur même du concept de modules configurables.
Dans la catégorie des modules configurables, certains modules sont conçus de façon qu'ils puissent être ajoutés ou retirés du produit sans avoir d'impact sur les fonctions principales. Ces modules optionnels peuvent ajouter des fonctions supplémentaires ou améliorer le côté esthétique du produit et ont un impact important sur la différenciation du produit.

2.3.3 Modules uniques

Ces modules sont conçus spécifiquement pour un usage ou pour un client en particulier. Les modules uniques confèrent une grande valeur de différenciation, mais ont un impact important sur la complexité.
Ces trois types de modules reflètent la flexibilité recherchée de l'individualisation de masse. La conception modulaire requiert l'identification des éléments standards et configurables pour limiter la complexité, tandis que la création des modules uniques permet de répondre à des besoins uniques pour offrir une personnalisation ultime du produit (Ming et al., 2007).

2.4 Stratégies d'individualisation de produits et choix du type de module correspondant

Dans l'individualisation de masse, la conception modulaire est couramment utilisée pour offrir une personnalisation tout en préservant une plateforme standard. Une des stratégies clés consiste à intégrer quelques modules uniques à un ensemble de modules standards et configurables, ce qui permet d'ajuster certaines fonctions, dimensions, caractéristiques esthétiques ou performances en ingénierie sur demande. Une autre approche est une configuration personnalisée par positionnement unique, qui combine des modules standards et configurables de manière à répondre à des besoins dimensionnels ou de placement uniques (Wang et al., 2017). L'important est d'aligner le choix du type selon la stratégie d'individualisation privilégiée.

2.5 Méthodes actuelles pour définir le type de modules

Certains travaux mentionnent la nécessité de définir des objectifs de modularité (Robertson and Ulrich, 1998). Sélectionner le type de chacun des modules et fixer des objectifs de modularité permet de minimiser la variété à non-valeur ajoutée pour le client (Kota and Sethuraman, 1998). Les méthodes pour définir le type de chacun des modules adaptées à la personnalisation de masse visent donc à standardiser le plus de composantes possible (Kota and Sethuraman, 1998).
D'autres études considèrent la possibilité des concepts à répondre à une gamme de besoins client plus large afin de réduire la variété (Zhuo et al., 2008). Le concept de plateforme peut aussi être utilisé pour standardiser davantage de modules et ainsi augmenter le nombre de modules qui entrent dans la définition de la plateforme (Rai and Allada, 2003). D'autres indices et calculs peuvent aider à formuler une recommandation de standardisation ou de modularisation des modules en considérant l'impact de la reconception, le niveau de couplage entre les pièces et le coût des pièces (Wee and Aurisicchio,

2018). Cependant, ces méthodes ne précisent pas la démarche à adopter pour établir le niveau de variété ou encore pousser la personnalisation jusqu'à rendre le module unique.
De plus, les outils et méthodes actuelles sont adaptées aux modules standards et modules configurables, sans élaborer sur les modules uniques. Ainsi, les outils présentés dans la littérature pour la personnalisation de masse peuvent s'avérer inadaptés à l'individualisation de masse qui a pour objectif d'offrir des produits uniques. Un modèle plus flexible selon la stratégie d'individualisation des produits permettrait de s'adapter à différents scénarios.
Enfin, les cadres existants n'abordent que rarement la coordination multidépartements entre le marketing, l'ingénierie ou la recherche et développement ainsi que la production et la logistique (Jiao and Tseng, 2000; Pakkanen et al., 2019; Robertson and Ulrich, 1998)
Basée sur ces éléments manquants de la littérature, la prochaine section aborde les thématiques à considérer pour l'élaboration d'un modèle décisionnel d'identification du type de chaque module pour réduire la complexité tout en individualisant le produit.

2.6 Thématiques à considérer pour une approche globale

Les 8 axes suivants ressortent de la littérature et constitueront les fondements du cadre décisionnel proposé.

2.6.1 Impact de la variété sur l'offre produit

La variété influence directement le positionnement et la proposition de valeur du produit. Le marketing occupe une place importante pour analyser la concurrence, la volonté de payer pour plus de personnalisation et la pertinence commerciale (Magnusson and Pasche, 2014; Salvador et al., 2020). L'évaluation de la concurrence, la segmentation des clients et la définition de la variété permettent d'adapter la proposition de valeur (Jiao and Tseng, 2000). L'orientation face au marché, fondée sur les besoins clients, constitue un enjeu clé pour aligner la personnalisation avec la faisabilité technique et économique (Kumar, 2004; Salvador et al., 2020).

2.6.2 Impact de la variété sur la complexité interne

La variété interne, associée à la diversification des composants et des modules, accroît la complexité de production et les coûts de gestion internes (Medini, 2015; Schuh et al., 2021). En effet, plus la variété interne augmente, plus le flux de matériaux, les délais et l'utilisation des ressources deviennent difficiles à prévoir (Rincon-Guevara et al., 2020; Schuh et al., 2021). La variété fonctionnelle ayant un bénéfice pour le client doit aussi être distinguée de la variété technique non utile pour le client, mais nécessaire, car ces deux dimensions influencent différemment la complexité (Jiao and Tseng, 2000; Medini, 2015). L'impact d'un niveau plus élevé de variété au sein d'un module ou de ses modules environnants ainsi que la possibilité de réutiliser les nouveaux modules sur d'autres plateformes sont aussi à considérer (Krebs and Ranze, 2015).

2.6.3 Impact de la variété sur la production, l'assemblage et la logistique

Une plus grande variété accroît aussi la complexité de la production, de l'assemblage et de la logistique, nécessitant davantage de ressources (Rincon-Guevara et al., 2020; Schuh et al., 2021). Repousser le point de découplage de la commande grâce au concept d'intégration de la personnalisation tardivement dans le processus d'assemblage aide à réduire les coûts d'inventaire (Jiao et al., 2007). Les outils, technologies et processus doivent cependant être adaptés pour maintenir une flexibilité adéquate, afin de gérer efficacement la variété. Ainsi, chaque module doit être évalué selon son impact sur les procédés.

2.6.4 Impact de la variété sur les tests, les validations et la qualité

Offrir un plus haut niveau de variété complexifie et augmente les procédures de vérification et de validation. Chaque configuration supplémentaire doit être évaluée afin d'assurer la conformité globale du produit (Biahmou, 2015). La multiplication des variants peut également accroître la probabilité d'erreurs qualité, en rendant plus difficiles la détection précoce des défauts et la gestion des tests (Li et al., 2019). Pour limiter cet effet, l'utilisation d'outils de gestion des requis dans un approche de modèle en V et le recours à la simulation facilitent l'identification rapide des incompatibilités et des risques avant même la production physique (Li et al., 2019; Pakkanen et al., 2020).

2.6.5 Impact de la variété sur les coûts de développement

La phase de conception peut représenter jusqu'à 70 % des décisions impactant les coûts sur tout le cycle de vie d'un produit, rendant cruciaux les choix liés à la variété (Qiu et al., 2022). L'ajout de variants de modules peut exiger une ingénierie sur demande pour certains modules uniques, entraînant une hausse des coûts de développement. Toutefois, la conception modulaire permet la réutilisation de composants et génère des économies d'échelle tout en réduisant le temps de conception (Jacobs et al., 2007; Okudan Kremer and Gupta, 2013; Shaik et al., 2015).

2.6.6 Impact de la variété sur la performance

Les architectures modulaires facilitent la personnalisation, mais peuvent impliquer des compromis sur la performance du produit, notamment en termes de poids ou de volume (Pakkanen et al., 2019; Rincon-Guevara et al., 2020). Trouver l'équilibre entre standardisation, interfaces découplées et augmentation de la variété exige un lot de compromis entre les coûts, la performance et la personnalisation (Jiao and Tseng, 2000; Shamsuzzoha, 2009). Ainsi, chaque module doit être évalué pour déterminer si la perte de performance ou de ventes liée à l'augmentation de la variété ou à la standardisation (Jiao et al., 2007; Kumar, 2004; Pakkanen et al., 2019).

2.6.7 Impact de la variété sur l'environnement

Offrir un niveau de variété plus élevé peut augmenter la consommation de ressources et générer davantage d'émissions, notamment lors de la production et de l'approvisionnement en matières premières (Mesa et al., 2020, 2020). Le recours à des méthodes de conception axées sur le cycle de vie contribue à limiter l'empreinte carbone et la production de déchets (Mesa et al., 2020). Par ailleurs, privilégier le recyclage, la réutilisation et la diminution de la consommation de ressources ou d'énergie dès la conception permet de réduire l'impact environnemental de la production (Mesa et al., 2020; Qiu et al., 2022). La conception modulaire facilite la réutilisation ainsi que la réparabilité et s'avère essentielle pour prolonger la durée de vie du produit favorisant son recyclage final.

2.6.8 Impact de la variété sur l'évolution du module dans le temps

Lorsque l'entreprise prévoit d'offrir une augmentation de la personnalisation au fil du temps, certains modules doivent pouvoir être améliorés ou remplacés sans perturber les autres composantes (Hvam et al., 2017). La conception modulaire atténue l'impact d'un changement de module en séparant les fonctionnalités (Bruun et al., 2013; Okudan Kremer and Gupta, 2013). Des interfaces standardisées facilitent également l'ajout ou la substitution de modules, permettant ainsi de suivre

l'évolution des besoins clients et des technologies avec le même produit (Magnusson and Pasche, 2014; Tseng et al., 2004). Les aspects relatifs à la configuration, à l'évolution et à la fabrication doivent être considérés simultanément pour maîtriser les coûts et éviter une augmentation excessive du nombre de variants de modules (Hvam et al., 2017).

2.7 Intégration de la définition du type de module dans le processus de développement de produits

Enfin, il apparaît que le moment où l'on décide du niveau de personnalisation est critique et doit être réalisé tôt dans le processus de développement de produits (Robertson and Ulrich, 1998; Zhuo et al., 2008). Dans un processus de développement de produit suivant une méthode Stage-Gate ou V-Model, la clarification du type de module pourrait permettre d'éviter des retours en arrière coûteux. Pour ce faire, le type de module doit être inclus dans les vérifications et les validation ou soumis comme livrable d'une gate (Li et al., 2019).

3 MÉTHODOLOGIE

Pour répondre à l'absence d'une approche globale dans le choix du type de modules, la méthodologie présente un cadre décisionnel fondé sur la littérature. La méthodologie comprend trois étapes : 1- l'analyse de la littérature, 2-la création du cadre décisionnel et 3-l'application à un cas de vélo électrique.

3.1 Analyse de la littérature

Une revue de la littérature, présentée en section 2, a été réalisée pour identifier huit axes clés influençant la décision sur le niveau de personnalisation de chaque module.

3.2 Création du cadre décisionnel

À partir de ces huit axes, 24 questions ont été formulées pour guider la sélection du type de module (standard, configurable ou unique) constituant la grille de décision présentée en section 4. Chaque question s'appuie sur des justifications de la littérature.

3.3 Application sur un cas de vélo électrique

Pour évaluer la pertinence du cadre décisionnel dans un contexte d'individualisation de masse, il a été testé sur un cas de vélo électrique déjà modularisé grâce à de nombreuses interfaces fournisseurs. L'application repose sur l'analyse des produits offerts sur le marché, une estimation des coûts de production et diverses hypothèses quant à l'augmentation du niveau de personnalisation. Les détails de cette application sont présentés en section 5.

4 PRÉSENTATION DU CADRE DÉCISIONNEL

4.1 Cadre décisionnel

Le cadre décisionnel se base sur 24 questions réparties en huit axes clés présentées au Tableau 1. Pour chaque module, une équipe pluridisciplinaire évalue chacune de ces questions afin de déterminer si la personnalisation apporte une valeur suffisante pour justifier l'augmentation de la complexité. Les réponses permettent : d'identifier les modules pouvant rester standards, d'évaluer la pertinence de créer des modules configurables et de valider la nécessité d'offrir un module unique cocréé par le client.

Tableau 1. Cadre décisionnel : Questions clés pour la sélection du type de module

#	Axe	Question
1	Impact de la variété sur l'offre produit	Dans quelle mesure les clients sont-ils prêts à payer un supplément pour obtenir de la variété supplémentaire sur ce module ?
		Est-ce qu'une variété supplémentaire sur ce module peut être un argument de vente contre la compétition ?
		Quelle est l'offre de la compétition sur cette caractéristique de ce module ?
		Est-ce que cette fonctionnalité est un différenciateur clé du produit face à la stratégie de gestion de la variété?
2	Impact de la variété sur la complexité interne	Quel est l'impact sur la complexité interne de ce module d'offrir un niveau plus élevé de variété sur ce module ?
		Quel est l'impact sur la complexité interne des modules environnants face à l'augmentation de variété de ce module?
		Ce module représente-t-il de la « variété fonctionnelle » ou de la « variété technique » ?
		Est-ce que la variété de ce module peut être réutilisée sur d'autres plateformes ou d'autres produits?
3	Impact de la variété sur la production, l'assemblage et la logistique	Quel est l'impact au niveau de la production des pièces d'offrir un niveau de variété plus élevé sur ce module ?
		Quel est l'impact au niveau de la logistique d'offrir un niveau de variété plus élevé sur ce module ?
		Quel est l'impact au niveau de l'assemblage d'offrir un niveau de variété plus élevé sur ce module ?
		Quel est l'impact de l'adaptation des outils, des technologies et des processus pour intégrer cette variété ?
		Quel est l'impact sur le point de découplage de la commande face à l'assemblage ?
		Est-ce que la variété peut être assemblée sous le concept de personnalisation tardive ?
4	Impact de la variété sur les tests, les validations et la qualité	Quel est l'impact d'offrir un plus haut niveau de variété sur le processus de vérification, de validation ou de certification sur le produit complet ?
		Quel est l'impact d'offrir un plus haut niveau de variété sur les inspections et les erreurs qualité ?
5	Impact de la variété sur les coûts de développement	Est-ce que l'augmentation de la variété entraîne une conception du module unique en ingénierie sur demande ?
		Quel est l'impact sur la conception d'offrir un niveau de variété plus élevé sur ce module ?
6	Impact de la variété sur la performance	Quels sont les compromis de performance de standardiser, d'augmenter la variété de ce module ou d'offrir une interface découplée et flexible ?
7	Impact de la variété sur l'environnement	Quel est l'impact sur la consommation de ressources (matières premières, énergie …) d'offrir un niveau de variété plus élevé sur ce module ?
		Quel est l'impact sur l'empreinte carbone d'offrir un niveau de variété plus élevé sur ce module ?
		Quel est l'impact sur la réutilisation, le recyclage, la revente du produit d'offrir un niveau de variété plus élevé sur ce module ?
8	Impact de la variété sur l'évolution du module dans le temps	Est-ce que l'entreprise projette offrir une plus grande personnalisation sur ce module dans le temps ?
		Est-ce que l'entreprise projette offrir un remplacement ou une amélioration de ce module dans le temps ?

4.2 Intégration dans le processus de développement de nouveaux produits

Le cadre décisionnel proposé vient en complémentarité de la Matrice d'application de la modularité présentée par Hvam et al. (2017) et répond à un enjeu identifié par ces mêmes auteurs : la nécessité de prendre les décisions majeures dès la phase initiale du projet. La matrice sert à positionner le niveau de modularité et le degré de détail de documentation des modules à viser selon la nature du produit. Pour utiliser cette matrice, il faut d'abord avoir identifié les modules et choisi leur type. Le cadre décisionnel développé dans cette recherche intervient donc en amont, lors des premières phases du développement de produit, pour déterminer le type de module approprié. Cette approche soutient les choix structurants qui influencent la modularité et permet de mieux contrôler la variété. Le cadre se positionne ainsi avant la génération et la validation des concepts, au niveau de l'architecture du produit.

Ces objectifs de modularité se doivent aussi d'être évolutifs face à l'avancement du processus de développement de nouveaux produits, notamment face à l'évolution des requis et des concepts choisis dans le temps. La conception, étant un processus itératif, implique de réviser périodiquement les objectifs de modularité pour tenir compte de l'évolution des requis clients et de l'émergence de nouveaux concepts (Li et al., 2019). Le changement d'un concept, d'un matériau ou d'une méthode de production peut justifier une révision du type de module. Ainsi, des revues périodiques au fil de l'avancement du projet pour valider que le niveau de variété initialement défini sont requises.

4.3 Évolutivité des objectifs de modularité au fil du processus de développement de produit

L'identification et la révision des objectifs de modularité se répètent à plusieurs niveaux de granularité tout au long du processus de développement de produit. Des approches comme le V-Model définissent plusieurs niveaux d'abstraction qui sont particulièrement pertinents pour les produits complexes (Li et al., 2019). Les objectifs de modularité peuvent ainsi être appliqués aux 4 niveaux inférieurs du V-Model, soit les niveaux équipement, système, sous-système et pièce.

4.4 Livrables préalables ou parallèles aux objectifs de modularité

Avant de décider du niveau de personnalisation pour chaque module, il est nécessaire de collecter et formaliser des livrables préliminaires. Le processus de développement de produit à haut niveau est généralement présenté comme un processus linéaire entre les différentes fonctions de l'entreprise combiné à une boucle itérative de développement et de validation de concepts. À la suite du démarrage du projet, les premières étapes réalisées par l'équipe marketing consistent à segmenter le marché, analyser et documenter les besoins clients. L'équipe d'ingénierie transforme ensuite les requis client en requis produit, puis en requis système. L'équipe d'ingénierie réalise alors la documentation de l'architecture de produits modulaires avec les diagrammes fonctionnels, logiques, opérationnels et physiques. La première découpe modulaire est établie à ce moment. En parallèle, l'équipe manufacturière établit la plateforme manufacturière pour guider l'équipe d'ingénierie sur les contraintes actuelles et futures des procédés de fabrication et d'assemblage (Ulrich & Eppinger, 2008, p. 24). Basé sur le processus de développement de produit présenté, le cadre décisionnel requiert que les étapes suivantes soient réalisées préalablement.

- Liste d'exigences client comprenant les attentes, les fonctions clés ainsi que la segmentation du marché.
- Une analyse de la compétition afin de situer la proposition de valeur dans un contexte concurrentiel (Jiao and Tseng, 2000)
- Une analyse fonctionnelle (Jiao and Tseng, 2000)
- Les spécifications techniques préliminaires du produit et des systèmes principaux (Vierlboeck and Nilchiani, 2021)
- Les contraintes manufacturières importantes, telles que les niveaux de flexibilité de la chaîne de production, le type d'aménagement et les procédés de fabrication principaux (Kumar, 2004)
- Une première version de la découpe modulaire et de l'identification des caractéristiques de chacun des modules (Du et al., 2001)

Ces livrables constituent la base requise pour amorcer la complétion du cadre décisionnel.

4.5 Positionnement du cadre décisionnel et des objectifs de modularité

La Figure 1 illustre comment le cadre décisionnel et l'élaboration d'objectifs de modularité s'intègrent dans les neuf concepts en forte relation avec la conception modulaire (Roy and Abdul-Nour, 2024). La découpe modulaire, la plateforme de produit et la modularité manufacturière sont ainsi des intrants essentiels au choix du type de module.

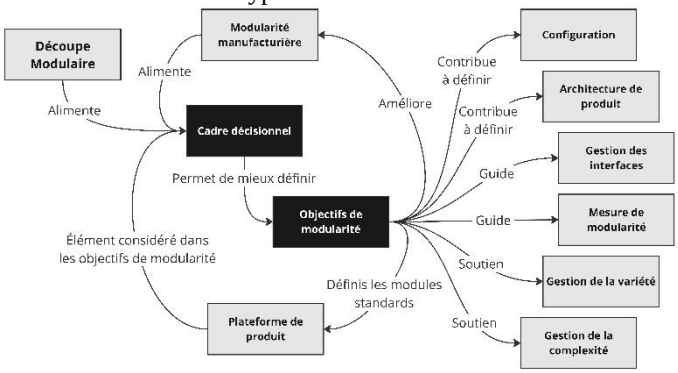


Figure 1. Positionnement entre le cadre décisionnel et les objectifs de modularité et les autres concepts de conception modulaire

Le cadre décisionnel peut être appliqué après un premier découpage en modules ou en parallèle de la découpe modulaire. La sélection préliminaire du type de module contribue ainsi à la première configuration, la clarification de l'architecture et de la plateforme de produit. L'idée de planifier dès le début du projet un module unique à un emplacement précis guide la sélection de concepts plus flexible au niveau des interfaces de ce module. L'évaluation hâtive de l'impact sur le manufacturier peut engendrer une réduction des coûts de production ou de logistique en assurant une considération dès la mise en place du modèle de production et du choix des méthodes de fabrication. Les mesures de modularité, la gestion de la variété, la gestion de la complexité et la gestion des interfaces peuvent ainsi être guidées pour chacun des modules en fonction des objectifs ciblés. L'établissement d'objectifs de modularité permet ainsi de limiter la prolifération de modules variants n'ayant pas de valeur pour le client et facilite ainsi le contrôle de la complexité.

4.6 Livrables alimentés par les objectifs de modularité

Une fois les objectifs de modularité établis pour chaque module, plusieurs livrables clés peuvent utiliser cette nouvelle information dans le processus de développement de nouveaux produits. Ces livrables peuvent inclure une représentation claire du niveau de personnalisation dans l'architecture modulaire

(Pakkanen et al., 2019), des informations préliminaires pour la configuration (Kumar, 2004; Pakkanen et al., 2020) et un ajustement adéquat de la charge de travail de développement (Robertson and Ulrich, 1998).

4.7 Rôles et responsabilités face aux objectifs de modularité

La contribution de chaque département s'avère essentielle pour aligner les objectifs de modularité avec la stratégie de l'entreprise. Le département marketing analyse les besoins

Tableau 2. Application du cadre décisionnel aux modules du vélo électrique

		Unité motrice		Batterie	Cadre	
#	Axes	Puissance	Nombre de vitesses	Capacité	Taille	Couleur et Style
1	Impact de la variété sur l'offre produit	Effet Moyen	Effet Faible	Effet Moyen à Élevé Surcoût possible	Effet Élevé	Effet Très Élevé
2	Impact de la variété sur la complexité interne	Effet Faible	Effet Faible	Effet Faible	Effet Élevé	Effet Élevé
3	Impact de la variété sur la production, l'assemblage et la logistique	Effet Moyen	Effet Moyen	Effet Faible	Effet Moyen	Effet Élevé si stratégie non flexible
4	Impact de la variété sur les tests, les validations et la qualité	Effet Élevé	Effet Élevé	Effet Élevé	Effet Élevé	Aucun Effet
5	Impact de la variété sur les coûts de développement	Effet Moyen	Effet Moyen	Effet Moyen	Effet Élevé	Aucun Effet
6	Impact de la variété sur la performance	Standardisation entraîne un coût supplémentaire	Standardisation entraîne un léger coût supplémentaire	Standardisation entraîne un poids supplémentaire	Perte de marché causée par la standardisation	Aucun Effet
7	Impact de la variété sur l'environnement et le volet social	Faible (Offrir une variété évite une consommation de matériaux supplémentaires)	Faible (Offrir une variété évite une consommation de matériaux supplémentaires)	Élevé (Offrir une variété évite une consommation de matériaux supplémentaires)	Faible (Offrir une variété évite une consommation de matériaux supplémentaires)	Aucun Effet
8	Évolution du module dans le temps	Remplacement en cas de défaillance ou de bris		Remplacement et évolution dans le temps	Aucune offre de remplacement	
	Objectif de modularité	**Configurable sur la puissance Standard sur le nombre de vitesses**		**Configurable pour la capacité**	**Configurable pour la taille Unique pour le design**	

clients et segmente le marché (Salvador et al., 2020), tandis que l'ingénierie réalise la génération de concepts, évalue la faisabilité technique et les répercussions sur les coûts. La production s'assure de la compatibilité avec le choix des procédés et la logistique (Hu et al., 2008, 2008). Le gestionnaire de projet coordonne l'ensemble, veillant à la cohérence entre les acteurs (Robertson and Ulrich, 1998). Cette approche transversale encourage la collaboration et vise à briser les silos, aligner les objectifs conflictuels (Jiao and Tseng, 1999; Rincon-Guevara et al., 2020), renforçant la cohérence du produit final et l'alignement des objectifs de modularité avec la stratégie de l'entreprise (Pakkanen et al., 2019).

Figure 2: Schéma d'architecture modulaire d'un vélo électrique à titre d'exemple

5 RÉSULTATS DE L'APPLICATION SUR UN CAS DE VÉLO ÉLECTRIQUE

Pour valider la pertinence du cadre décisionnel, un cas d'application de vélo électrique modulaire a été réalisé. Ce produit intègre déjà plusieurs modules et se prête à l'individualisation de masse. La Figure 2 illustre la découpe simplifiée de trois des modules principaux d'un vélo électrique, soit : unité motrice, batterie, cadre. Chaque module peut être évalué selon le cadre décisionnel pour déterminer son niveau de variété. Le Tableau 2 présente un exemple de réponses succinctes pour chacun des modules. Les 8 axes sont remplis pour chacun des trois modules identifiés pour l'exemple. L'objectif de modularité est attribué pour chacun des modules.

6 ANALYSE

6.1 Principaux constats

Pour arriver à des coûts réduits, la personnalisation doit s'agencer à une plateforme commune pour réduire l'impact global sur le système de production et les délais de mise en marché. Les composants standards et les modules configurables assurent ainsi la rentabilité et la stabilité technique, amortissant les coûts de développement et préservant les avantages de la production de masse. La méthode proposée vise à identifier les modules à standardiser et à concentrer l'adaptation sur les modules uniques seulement. Lorsqu'une demande d'apparence individualisée survient, l'identification du type de module lors de la création initiale de l'architecture permet ainsi de réutiliser les modules standardisés ou configurables correspondant aux besoins du client. Par exemple, l'unité motrice du vélo pourrait être reprise pour un produit unique d'un nouveau segment de vélos électriques évitant l'introduction de variantes supplémentaires. Les modules uniques doivent être limités afin de contenir la complexité et les coûts supplémentaires. Ainsi,

une définition claire du type de module contribue à planifier le développement, à allouer efficacement les ressources et à contrôler la complexité dans l'ensemble de l'organisation.

6.2 Interprétation des résultats

Les observations confirment la pertinence de ne personnaliser que les modules à forte valeur ajoutée pour le client, évitant ainsi de modifier inutilement les composants critiques déjà optimisés. Lorsqu'il est nécessaire d'offrir une personnalisation plus poussée et permettre l'amélioration du produit au fil du temps, des interfaces flexibles et découplées physiquement sont préférées pour assurer la performance fonctionnelle, tandis que des interfaces plus standards suffisent pour la personnalisation esthétique.

Lors de la réalisation du cas d'application, la collaboration, la communication et l'alignement vers un objectif global demeurent un défi. Cependant, la mise en place de rencontres récurrentes par un chef de projet ou par un département neutre responsable de la conception modulaire assure les discussions et l'alignement de l'architecture de produit.

La définition claire du type de module, soutenue par le cadre décisionnel, favorise l'alignement entre les départements et accélère la collaboration grâce à une meilleure circulation de l'information, tout en clarifiant les attentes. Ce nouvel outil agit comme un outil pouvant être suivi par une gouvernance pour contrôler la complexité croissante.

6.3 Limites de l'étude

L'application du cadre décisionnel sur un vélo électrique a permis une première validation dans un environnement industriel simple. Cette étape offre une preuve de concept et une première validation mettant en lumière les bénéfices concrets pour la gestion de la complexité, particulièrement dans un contexte d'entreprise présentant une quantité de ressources limitées. Trois autres études de cas en entreprise sont en cours pour poursuivre la validation du cadre décisionnel, notamment dans le secteur du transport de passagers et des véhicules récréatifs. Pour chacun des cas de validation, un contexte de produits complexes, multiplateformes, à haute variété et/ou normatif sont présent visant ainsi à étendre la portée du cadre décisionnel.

De plus, le cadre décisionnel actuel, basé sur le jugement d'experts, sera amélioré pour évaluer quantitativement chacun des axes afin d'accroître la robustesse, l'objectivité et la réplicabilité des résultats.

7 CONCLUSION

Cet article propose un cadre décisionnel permettant de déterminer pour chaque module le niveau de variété pertinent. Ce cadre décisionnel permet une transition vers l'individualisation de masse en contrôlant la complexité. L'analyse des résultats obtenus à travers une application sur un cas de vélo électrique suggère que cette approche permet de contrôler efficacement la complexité interne tout en offrant des produits uniques répondant aux besoins des clients. Cette recherche fournit un outil structuré pour guider la décision entre modules standard, configurables et uniques. L'approche favorise la collaboration interdépartements, contribue à améliorer le ratio coûts/bénéfices de la personnalisation et facilite l'alignement avec une stratégie modulaire globale.

Les recherches futures visent à appliquer le cadre décisionnel sur plusieurs produits complexes à haute variété. Un second cas pilote d'application dans un contexte normatif est en cours de déploiement. Parallèlement, cette démarche fait actuellement l'objet de tests dans le cadre d'une stratégie de développement de produits complexes à haute variété. Les recherches présentées visent ainsi à tester son applicabilité et sa flexibilité dans des environnements industriels à haute variété.

8 RÉFÉRENCES

Abdulnour, S., Baril, C., Abdulnour, G., and Gamache, S. (2022). Implementation of Industry 4.0 Principles and Tools: Simulation and Case Study in a Manufacturing SME. *Sustainability*, *14*(10), 6336.

Biahmou, A. (2015). Systems Engineering. In J. Stjepandić, N. Wognum, & W. J.C. Verhagen (Eds.), *Concurrent Engineering in the 21st Century* (pp. 221–254). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-13776-6_9

Bogner, E., Löwen, U., and Franke, J. (2017). Systematic Consideration of Value Chains with Respect to the Timing of Individualization. *Procedia CIRP*, *60*, 368–373.

Bouchard, S., Abdulnour, G., and Gamache, S. (2022). Agility and Industry 4.0 Implementation Strategy in a Quebec Manufacturing SME. *Sustainability*, *14*(13), 7884.

Bouchard, S., Gamache, S., and Abdulnour, G. (2023). Operationalizing Mass Customization in Manufacturing SMEs—A Systematic Literature Review. *Sustainability*, *15*(4), 3028.

Bruun, H. P. L., Mortensen, N. H., and Harlou, U. (2013). Interface diagram: Design tool for supporting the development of modularity in complex product systems. *Concurrent Engineering Research and Applications*, *22*(1), 62–76.

Du, X., Jiao, J. R., and Tseng, M. M. (2001). Architecture of Product Family: Fundamentals and Methodology. *Concurrent Engineering Research and Applications*, *9*(4), 309–325.

Greve, E., Rennpferdt, C., and Krause, D. (2020). Harmonizing cross-departmental Perspectives on Modular Product Families. In K. e. a. Mpofu (Chair), *30th CIRP Design on Design, CIRP Design 2020*, Pretoria, South Africa. https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.198

Hsiao, W.-P., and Chiu, M.-C. (2014). A Mass Personalization Methodology Based on Co-creation. In *21st ISPE Inc. International Conference on Concurrent Engineering, CE 2014.* Symposium conducted at the meeting of Beijing Jiaotong University, China. https://doi.org/10.3233/978-1-61499-440-4-698

Hu, S. J., Zhu, X., Wang, H., and Koren, Y. (2008). Product variety and manufacturing complexity in assembly systems and supply chains. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, *57*(1), 45–48.

Hvam, L., Herbert-Hansen, Z. N. L., Haug, A., Kudsk, A., and Mortensen, N. H. (2017). A framework for determining product modularity levels. *Advances in Mechanical Engineering*, *9*(10), 1-14.

Jacobs, M., Vickery, S. K., and Droge, C. (2007). The effects of product modularity on competitive performance: Do integration strategies mediate the relationship? *International Journal of Operations & Production Management*, *27*(10), 1046–1068.

Jiao, J. R., Simpson, T. W., and Siddique, Z. (2007). Product family design and platform-based product development: A state-of-the-art review. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *18*(1), 5–29.

Jiao, J. R., and Tseng, M. M. (1999). Methodology of developing product family architecture for mass customization. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *10*(1), 3–20.

Jiao, J. R., and Tseng, M. M. (2000). Fundamentals of product family architecture. *Integrated Manufacturing Systems*, *11*(7), 469–483.

Kota, S., and Sethuraman, K. (1998). Managing variety in product families through design for commonality. In *10th International Conference on Design Theory and Methodology, ASME 1998 Design Engineering Technical Conferences, (DETC 1998),* Atlanta, Georgia, USA. https://doi.org/10.1115/DETC98/DTM-5651

Krebs, T., and Ranze, C. (2015). Market-oriented variant management (position paper). In Juha Tiihonen, Andreas Falkner and Tomas Axling (Chair), *17th International Configuration Workshop, ConfWS 2015,* Vienna, Austria. https://doi.org/10.1007/978-3-658-29943-9

Kumar, A. (2004). Mass customization: Metrics and modularity. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, *16*(4 SPEC. ISS), 287–311.

Li, Q., Wei, H., Yu, C., and Wang, S. (2019). Model and Data Driven Complex Product Development: from V, Double Vs to Triple Vs. In *2019 International Conference on Intelligent Computing, Automation and Systems (ICICAS)* (pp. 860–864). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICICAS48597.2019.00185

Magnusson, M., and Pasche, M. (2014). A contingency-based approach to the use of product platforms and modules in new product development. *Journal of Product Innovation Management*, *31*(3), 434–450.

Medini, K. (2015). Modularity and variety spinoffs: A supply chain planning perspective. *International Journal of Industrial Engineering : Theory Applications and Practice*, *22*(6), 753–768.

Mesa, J. A., Esparragoza, I., and Maury, H. (2020). Modular architecture principles–MAPs: a key factor in the development of sustainable open architecture products. *International Journal of Sustainable Engineering*, *13*(2), 108–122.

Ming, X. G., Yan, J. Q., Lu, W. F., Ma, D. Z., and Song, B. (2007). Mass production of tooling product families via modular feature-based design to manufacturing collaboration in PLM. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *18*(1), 185–195.

Okudan Kremer, G. E., and Gupta, S. (2013). Analysis of modularity implementation methods from an assembly and variety viewpoints. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *66*(9-12), 1959–1976.

Pakkanen, J., Juuti, T., and Lehtonen, T. (2019). Identifying and addressing challenges in the engineering design of modular systems–case studies in the manufacturing industry. *Journal of Engineering Design*, *30*(1), 32–61.

Pakkanen, J., Juuti, T., Lehtonen, T., Peltonen, J., and Laine, R. (2020). Conceptual model of modularisation. In N. H. Mortensen, C. T. Hansen, & M. Deininger (Chairs), *Balancing Innovation and operation.* Symposium conducted at the meeting of Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark. https://doi.org/10.35199/NORDDESIGN2020.12

Qiu, C., Tan, J., Liu, Z., Mao, H., and Hu, W. (2022). Design Theory and Method of Complex Products: A Review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, *35*(103), 1–16.

Rai, R., and Allada, V. (2003). Modular product family design: Agent-based pareto-optimization and quality loss function-based post-optimal analysis. *International Journal of Production Research*, *41*(17), 4075–4098.

Rincon-Guevara, O., Samayoa, J., and Deshmukh, A. (2020). Product design and manufacturing system operations: An integrated approach for product customization. In *48th SME North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 48.* Symposium conducted at the meeting of University of Tennessee Knoxville, Knoxville, TN, USA. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.020

Robertson, D., and Ulrich, K. (1998). Planning for Product Platforms. *Sloan Management Review*, *39*(4), 19–31.

Roy, M.-A., and Abdul-Nour, G. (2024). Integrating Modular Design Concepts for Enhanced Efficiency in Digital and Sustainable Manufacturing: A Literature Review. *Applied Sciences*, *14*(11), 4539.

Roy, M.-A., Abdul-Nour, G., and Gamache, S. (2023). Implementation of an Industry 4.0 Strategy Adapted to Manufacturing SMEs: Simulation and Case Study. *Sustainability*, *15*(21), 15423.

Salvador, F., Piller, F. T., and Aggarwal, S. (2020). Surviving on the long tail: An empirical investigation of business model elements for mass customization. *Long Range Planning*, *53*(4), 1–17.

Schuh, G., Guetzlaff, A., Schmidhuber, M., and Krug, M. (2021). Creating Transparency on Product Variety Through Data-driven Similarity Analysis. In *2021 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, IEEM 2021,* Singapore. https://doi.org/10.1109/IEEM50564.2021.9672806

Shaik, A. M., Rao, V. K., and Rao, C. S. (2015). Development of modular manufacturing systems—a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *76*(5-8), 789–802.

Shamsuzzoha, A. (2009). Platform-based Product Development in Order to Deal with Varieties in Production Line. In *2009 International Conference on Computers and Industrial Engineering, CIE 2009.* Symposium conducted at the meeting of University of Technology of Troyes, Troyes. https://doi.org/10.1109/ICCIE.2009.5223635

Tseng, H.-E., Chang, T.-S., and Yang, Y.-C. (2004). A connector-based approach to the modular formulation problem for a mechanical product. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *24*(3-4), 161–171.

Ulrich, K. T., and Eppinger, S. D. (2008). *Product design and development* (4th Ed.). McGraw-Hill Higher Education.

Vierlboeck, M., and Nilchiani, R. R. (2021). Requirement Engineering in the Age of System and Product Complexity – A Literature Review. In *2021 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)* (pp. 1–8). IEEE. https://doi.org/10.1109/ISSE51541.2021.9582439

Viero, C. F., Piran, F. A. S., Vaccaro, G., and Kreutz, B. (2015). Design automation and modularization. In S. Cetinkaya & J. K. Ryan (Chairs), *Industrial and Systems Engineering Research Conference,* Nashville, Tennessee.

Wang, Y., Ma, H.-S., Yang, J.-H., and Wang, K.-S. (2017). Industry 4.0: a way from mass customization to mass personalization production. *Advances in Manufacturing*, *5*(4), 311–320.

Wee, T. P., and Aurisicchio, M. (2018). Modularisation for construction: A data driven approach. In *13th Biennial Norddesign Conference, NordDesign 2018.* Symposium conducted at the meeting of Linköping University, Linköping, Sweden.

Zhuo, L., Yoke San, W., and Kim Seng, L. (2008). Integrated approach to modularize the conceptual product family architecture. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *36*(1-2), 83–96.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Gestion intelligente des déchets dans le contexte de l'industrie 4.0

NADIA BAHRIA[1], MANEL BELLOUMI[2], NAJD LAJNEF[3]

[1]OASIS, École Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Université de Tunis El Manar, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Tunis
Tunis, Tunisie
nadia.bahria@enit.utm.tn

[2] Ecole Polytechnique Internationale de Tunis
Tunis, Tunisie
m.belloumi22096@pi.tn

[3] Ecole Polytechnique Internationale de Tunis
Tunis, Tunisie
n.lajnef22144@pi.tn

***Résumé* – La gestion des déchets représente un défi majeur pour les villes et les industries, nécessitant des solutions innovantes pour améliorer l'efficacité opérationnelle et réduire l'impact environnemental. Une collecte inefficace entraîne des coûts élevés, une surcharge des infrastructures et une augmentation des émissions polluantes. L'intégration des technologies intelligentes, telles que l'Internet des Objets (IoT) et l'intelligence artificielle, offre une approche dynamique permettant d'adapter en temps réel les tournées de collecte en fonction des besoins réels. Ce papier propose un modèle d'optimisation permettant d'améliorer la gestion des déchets en intégrant des données en temps réel pour ajuster les itinéraires et optimiser l'utilisation des ressources. En tenant compte du taux de remplissage des bacs, des contraintes logistiques et des disponibilités des camions, cette approche vise à réduire les distances parcourues, minimiser les coûts et limiter l'empreinte carbone. L'objectif est d'assurer une gestion plus efficace et durable des déchets, tout en améliorant la qualité de vie urbaine et la performance des services de collecte.**

***Mots-clés :* Gestion intelligente des déchets, optimisation logistique, technologies IoT.**

***Abstract* – Waste management is a significant challenge for cities and industries, requiring innovative solutions to improve operational efficiency and reduce environmental impact. Inefficient collection leads to high costs, overburdened infrastructure, and increased pollution emissions. The integration of smart technologies, such as the Internet of Things (IoT) and artificial intelligence, offers a dynamic approach that allows real-time adaptation of collection routes based on actual needs. This paper proposes an optimization model aimed at improving waste management by integrating real-time data to adjust routes and optimize resource usage. By considering bin fill levels, logistical constraints, and truck availability, this approach seeks to reduce travel distances, minimize costs, and lower the carbon footprint. The goal is to ensure a more efficient and sustainable waste management system while enhancing urban living quality and collection service performance.**

***Keywords* – Smart waste management, logistics optimization, IoT technologies.**

1 INTRODUCTION

L'urbanisation rapide et l'accroissement de la densité démographique dans les zones urbaines entraînent une augmentation des quantités de déchets, ce qui pose des enjeux environnementaux, sociaux et économiques importants. Face à ces défis, la gestion efficace des déchets est devenue une priorité pour les décideurs et les municipalités. L'adoption d'une approche durable s'avère indispensable pour réduire l'impact environnemental, préserver les ressources naturelles et améliorer la qualité de vie des citoyens.

Dans ce contexte, l'optimisation de la collecte des déchets urbains représente un levier essentiel pour répondre à ces défis contemporains. L'intégration des principes de logistique inversée permet de transformer les processus traditionnels de gestion des déchets en systèmes plus responsables et efficaces. L'objectif principal est de minimiser les émissions de dioxyde de carbone (CO_2) et la consommation de carburant, tout en améliorant l'efficacité opérationnelle des flottes de collecte.

Ces efforts s'inscrivent dans une perspective plus large de réduction de l'empreinte écologique et de transition vers une économie circulaire.

Ainsi, l'intégration des technologies IoT dans gestion des déchets offre des perspectives prometteuses pour concevoir des solutions durables, adaptées aux besoins des villes modernes. Les capteurs IoT permettent de collecter en temps réel des données sur les niveaux de remplissage des conteneurs, les types de déchets et leur localisation. Ces informations, couplées à des algorithmes avancés de traitement des données des quantités de déchets, offrent la possibilité de prédire les besoins de collecte. Une telle approche permet de passer d'un modèle réactif, souvent inefficace, à un modèle prédictif et proactif, réduisant ainsi les trajets inutiles, les coûts opérationnels, et les émissions de gaz à effet de serre.

Le reste de ce papier sera organisé comme suit. La section 2 sera dédiée à l'état de l'art, où nous passerons en revue les travaux antérieurs dans ce domaine. La section 3 mettra en lumière les limites des approches existantes, tout en soulignant les contributions de notre étude. Ensuite, dans la section 4, nous présenterons la modélisation du processus étudié. La section 5 introduira le modèle mathématique développé pour aborder les problématiques identifiées. La section 6 exposera les résultats expérimentaux obtenus. Enfin, la section 7 conclura le papier en récapitulant les principales contributions et en proposant des perspectives pour les recherches futures.

2 ETAT DE L'ART

Cette section est dédiée à la présentation d'une synthèse des articles sélectionnés, qui ont traité différentes approches pour améliorer la gestion des déchets grâce à l'intégration de technologies avancées. Une analyse de ces travaux met en évidence leurs contributions spécifiques et permet de formuler les axes d'orientation de nos contributions.

Parmi les travaux examinés, plusieurs études se concentrent sur l'utilisation de l'Internet des Objets (IoT) pour optimiser les systèmes de collecte de déchets. Par exemple, [Jose M. Gutierrez et al., 2015] ont proposé un système intelligent basé sur des capteurs surveillant en temps réel les niveaux de remplissage des conteneurs. Ce système utilise des algorithmes d'optimisation appliqués à la théorie des graphes pour planifier les itinéraires les plus efficaces, testés dans la ville de Copenhague. De manière similaire, [De Morais et al., 2022] ont développé un modèle d'optimisation dynamique exploitant des données en temps réel et intégrant des techniques d'apprentissage automatique, telles que les modèles de Markov cachés, pour minimiser les coûts et l'impact environnemental. Ces travaux soulignent l'efficacité des technologies IoT et des méthodes d'optimisation dans la réduction des surplus des déchets et des émissions de carbone, bien qu'ils engendrent parfois des coûts à court terme.

D'autres recherches mettent l'accent sur les modèles d'optimisation mathématique pour résoudre les problèmes de routage des véhicules (VRP) dans le contexte de la collecte des déchets. [Jia-Wei Lu et al., 2015] ont appliqué des techniques combinant capteurs et algorithmes pour analyser les avantages de la collecte différenciée par rapport à la collecte conjointe, en mettant en lumière l'importance de technologies telles que le GPS, les SIG et le RFID. [Christina Hess et al., 2023] se sont penchés sur des approches systématiques intégrant des modèles heuristiques et méta-heuristiques, tout en insistant sur la durabilité grâce à la logistique inverse et l'économie circulaire. Dans le même contexte, [Rodriguez-Melquiades et Ramirez Cerna, 2023] ont développé un modèle bi-objectif visant à réduire les émissions de CO2 et les coûts opérationnels tout en assurant une logistique urbaine efficace. [David Varghese et al., 2020] ont introduit un indice vert pour inciter à de meilleures pratiques de tri et de recyclage.

Par ailleurs, plusieurs travaux ont traité des approches innovantes pour adapter les systèmes de collecte à des besoins spécifiques ou pour résoudre des problématiques complexes. [Ricardo Ewerta et al., 2021] ont étudié la faisabilité de l'électrification des flottes de collecte à Berlin, démontrant que malgré une augmentation des coûts d'exploitation, les émissions de gaz à effet de serre peuvent être réduites jusqu'à 99 %. De leur côté, [Nikouei Mehr et McGarvey, 2017] ont proposé une optimisation robuste pour faire face aux incertitudes des coûts liés à la gestion des déchets, tandis que [Hailin Wu et al., 2020] ont intégré des contraintes probabilistes et des émissions de carbone dans le processus de prise de décision pour améliorer l'efficacité des modèles de collecte. [Gdowska et al., 2019] ont enrichi ce domaine en développant un modèle bi-objectif pour minimiser les coûts et réduire le nombre de véhicules nécessaires, tout en mettant en avant l'importance des stratégies de recyclage.

Ces études, bien que variées dans leurs méthodologies et leurs objectifs, convergent vers un même but : améliorer la gestion des déchets urbains en intégrant des outils technologiques et des approches durables. Cette revue permet ainsi de tracer les grandes lignes de notre contribution future, en identifiant les lacunes à combler et les pistes d'innovation prometteuses.

3 LIMITES ET CONTRIBUTIONS

L'article de [Rodriguez-Melquiades et Ramirez Cerna, 2023] présente une contribution intéressante, mais il comporte une limite importante liée à l'utilisation d'une projection cartésienne pour représenter les points de collecte. Cette méthode simplifie la modélisation en ignorant les réalités géographiques telles que les routes, les obstacles et les variations de terrain. Si cette approche offre une certaine précision géométrique, elle reste toutefois limitée en raison de son recours au calcul des distances à vol d'oiseau. Ce dernier ne tient pas compte des itinéraires réels empruntés par les véhicules de collecte. Par conséquent, bien que les distances calculées soient techniquement correctes d'un point de vue géométrique, elles ne reflètent pas la réalité opérationnelle. En effet, les trajets réels peuvent être significativement plus longs en raison de la configuration des routes, des obstacles physiques, des infrastructures urbaines ou encore des réglementations de circulation.

Prenons, par exemple, le cas d'une ville montagneuse. Un itinéraire calculé à vol d'oiseau pourrait apparaître comme étant direct et optimal, mais en pratique, les véhicules de collecte seraient confrontés à des défis tels que des pentes abruptes, des routes sinueuses et des détours inévitables. Ces contraintes augmentent non seulement la distance réelle parcourue, mais également le temps nécessaire pour effectuer la collecte. Dans ce contexte, une entreprise utilisant une telle méthode risque de sous-estimer les temps de trajet, ce qui pourrait entraîner des pertes significatives en termes de temps et des coûts opérationnels additionnels au quotidien. À long terme, ces écarts accumulés pourraient nuire à la performance globale de l'entreprise et réduire l'efficacité de ses opérations de collecte.

Pour pallier ces limites, il serait pertinent d'intégrer des outils de géolocalisation avancés, comme les systèmes d'information

géographique (SIG) ou les algorithmes de routage basés sur des cartes routières détaillées, afin de mieux refléter les contraintes réelles du terrain. Cette amélioration pourrait non seulement renforcer la précision des modèles, mais aussi offrir des gains substantiels en termes de planification et d'optimisation des ressources.

L'utilisation des capteurs pour mesurer la quantité et par suite déterminer la demande de chaque point est une approche qui peut offrir des avantages en termes de précision et d'automatisation dans certaines industries mais, cette méthode présente aussi des défis importants, surtout en ce qui concerne les coûts, les risques environnementaux et la sécurité.

L'utilisation des capteurs dans différents domaines présente plusieurs défis techniques et pratiques qui peuvent limiter leur efficacité et leur adoption à grande échelle. L'une des principales limites de l'utilisation de capteurs est leur coût. Les capteurs de haute précision, peuvent être très coûteux. Cela inclut non seulement le prix des capteurs eux-mêmes mais aussi les coûts d'installation, de maintenance et de calibration. Les capteurs peuvent également soulever des problèmes de sécurité dans des zones non surveillées. Étant des dispositifs électroniques, ils sont vulnérables aux actes de vandalisme ou de sabotage. Dans certaines zones, des capteurs peuvent être endommagés ou détruits, ce qui entraîne une perte de données et une mauvaise évaluation des besoins de collecte. • Impact environnemental : Les capteurs qui sont électroniques, peuvent avoir un impact environnemental lorsqu'ils sont jetés ou non recyclés correctement. De plus, certains types de capteurs peuvent contenir des matériaux polluants ou des composants qui nécessitent des conditions spécifiques pour leur recyclage. Par ailleurs, les capteurs traditionnels peuvent avoir des limitations en termes de précision. Par exemple, les capteurs basés sur le poids peuvent être affectés par des facteurs externes, tels que les conditions météorologiques ou les vibrations lors de la collecte. Cela peut entraîner des mesures inexactes et fausser les estimations de la quantité de déchets à collecter.

Pour surmonter ces limitations, il serait intéressant d'explorer des alternatives. Par exemple, l'utilisation de drones équipés de caméras et de technologies de reconnaissance d'image pourrait permettre une estimation plus précise de la quantité de déchets.

De plus, l'utilisation de systèmes basés sur l'intelligence artificielle pourrait analyser ces données pour prévoir la demande de collecte avec une meilleure précision.

4 MODELISATION DU NOUVEAU PROCESSUS

Le processus débute par la collecte de données à partir d'images capturées par des drones, permettant de générer, à l'aide d'un modèle de ML, les charges à transporter, réparties par périodes (matin, après-midi et nuit). En parallèle, l'application de l'algorithme de Dijkstra, alimenté par les distances extraites de Google Maps et les facteurs de trafic, permet de déterminer les itinéraires optimaux. Ces résultats, comprenant les charges et les itinéraires, sont intégrés dans un programme de résolution du Green Vehicle Routing Problem with Constraints (GVRP-C), implémenté en Python, qui assigne ces trajets et ces charges à chaque camion. Enfin, ces informations permettent d'organiser efficacement la collecte des déchets, garantissant une gestion optimale des ressources et une réduction des coûts opérationnels (Figure 1).

4.1 Collecte de données géographiques

La collecte de données géographiques est une étape essentielle pour optimiser les itinéraires de collecte des déchets. Dans cette optique, différentes méthodes peuvent être utilisées pour obtenir des informations détaillées sur les itinéraires, les points de collecte et les conditions de circulation, chacune présentant des avantages et des spécificités.

Pour éviter les coûts élevés associés à l'utilisation continue de l'API Google Maps, nous avons opté pour une méthode d'extraction manuelle des distances. En utilisant Google Maps, nous avons pu déterminer les distances entre les différents points de collecte en tenant compte des itinéraires réels empruntés par les véhicules. Bien que cela ne soit pas automatisé et ni efficace qu'une intégration d'API, cela permet de récupérer des informations essentielles sur les distances et les données précises, basées sur des trajets effectifs plutôt que sur des approximations théoriques sans avoir payer des frais mensuels élevés.

La figure 2 montre les valeurs des facteurs de trafic de Google Maps, allant de 0 à 11, avec des couleurs représentant différentes intensités de trafic. Le bleu indique un trafic léger, tandis que le vert correspond à un trafic modéré. Le jaune et l'orange signalent un trafic plus dense, tandis que le rouge et le noir montrent des niveaux de trafic très élevés. Afin d'affiner l'analyse des conditions de circulation, nous avons défini un intervalle de valeurs de trafic compris entre 1 et 2.

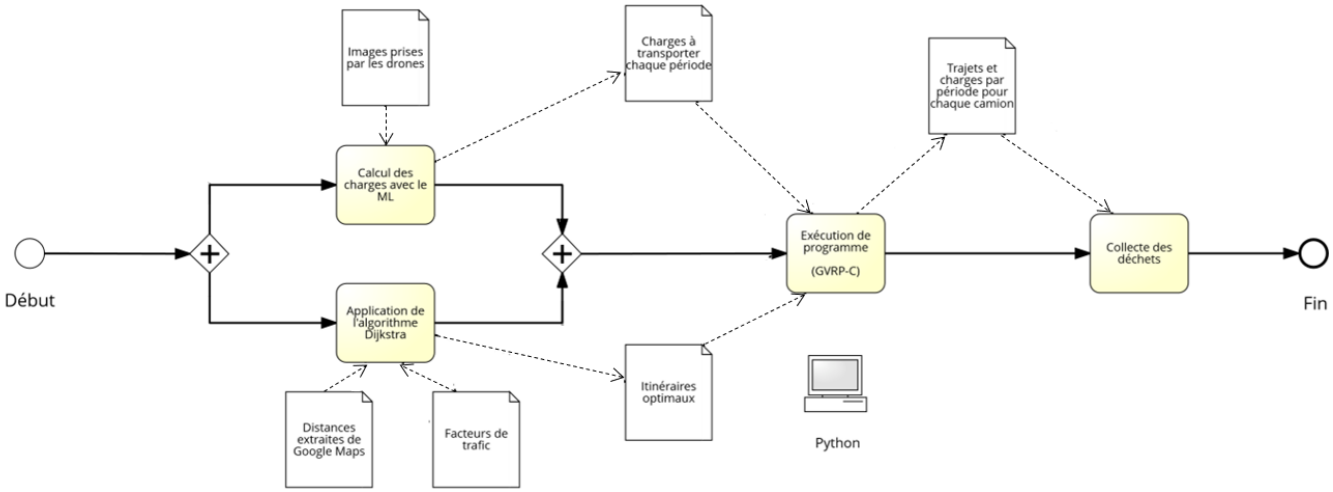


Figure 1. Processus de notre modèle

Cet intervalle sera subdivisé en sous-valeurs telles que 1.1, 1.2, 1.3, et ainsi de suite jusqu'à 2, ce qui permettra une évaluation plus précise des variations de trafic sur les itinéraires étudiés.

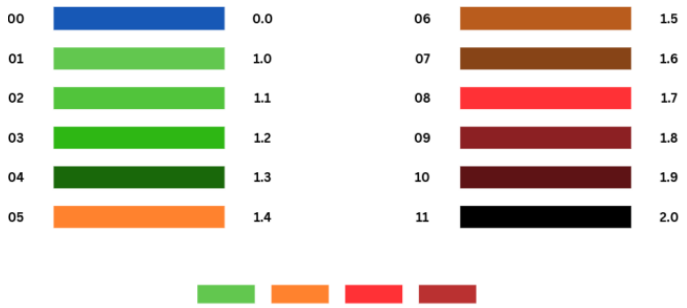


Figure 2. Facteurs de trafic

4.2 Utilisation des drones et du ML

L'intégration des drones et du ML dans le processus de collecte des déchets représente une avancée technologique pour optimiser les opérations. C'est pourquoi nous avons opté pour cette méthode pour estimer la masse des déchets dans les points de collecte, en utilisant des drones équipés de caméras et un modèle de ML. Cette approche fournit une estimation précise de la masse des déchets et améliore les prévisions des besoins en collecte.

Les drones équipés de caméras haute résolution survolent quotidiennement les points de collecte et capturent des images détaillées des déchets accumulés.

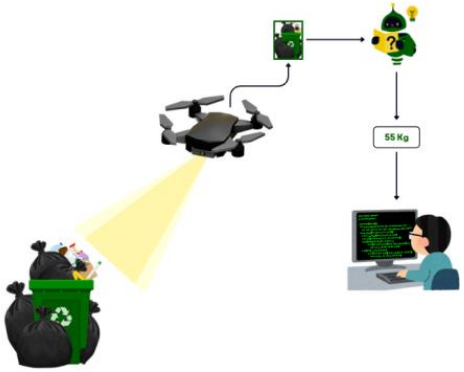


Figure 3. Processus de fonctionnement de drone

Cette approche offre des estimations précises de la masse des déchets et améliore considérablement la prévision des besoins en collecte.

Le fonctionnement du système repose sur plusieurs atouts majeurs. D'une part, les prévisions dynamiques fournies par le machine learning permettent d'ajuster les estimations quotidiennement en fonction des dernières données disponibles, offrant une réactivité bien supérieure à celle des capteurs fixes, souvent rigides et limités sans modifications physiques. D'autre part, le modèle de machine learning s'améliore continuellement à mesure qu'il est alimenté par de nouvelles données. Chaque image capturée par les drones rend le système plus intelligent, contrairement aux capteurs de masse, dont les capacités d'adaptation sont relativement limitées. Cette amélioration continue des prévisions garantit une précision accrue au fil du temps.

En outre, cette technologie contribue directement à l'optimisation des ressources. Grâce à des prévisions fiables, le système peut planifier les tournées de collecte de manière optimale et répartir les ressources plus efficacement. Par exemple, en identifiant à l'avance les points de collecte les plus chargés, il est possible de réaffecter les camions ou de modifier les horaires de collecte pour éviter les retards et maximiser l'efficacité opérationnelle. Les drones survolent quotidiennement les points de collecte, capturant des images détaillées des déchets accumulés, et fournissent des données en temps réel qui enrichissent le modèle de machine learning.

Cependant, cette technologie doit s'inscrire dans un cadre qui tient compte des réalités géographiques et des itinéraires réels empruntés par les véhicules de collecte. En effet, comme souligné dans l'article de [Rodriguez-Melquiades et Ramirez Cerna, 2023], l'utilisation de projections cartésiennes ou de calculs à vol d'oiseau peut introduire des biais importants dans la modélisation des distances. Bien que cette méthode simplifie la représentation des points de collecte, elle ignore les obstacles géographiques, les contraintes routières et les variations de terrain, ce qui peut entraîner des écarts significatifs entre les estimations et la réalité opérationnelle.

Dans des contextes complexes, comme les zones montagneuses, ces biais peuvent engendrer des temps de trajet sous-estimés et des inefficacités logistiques, augmentant ainsi les coûts opérationnels. L'intégration de systèmes d'information géographique (SIG) et d'algorithmes de routage avancés pourrait compléter l'usage des drones et du ML pour pallier ces limitations, garantissant une meilleure adéquation entre la planification et les contraintes réelles du terrain. Ainsi, la combinaison de ces outils technologiques offre une solution complète et innovante pour relever les défis de la collecte des déchets.

Le machine learning joue un rôle clé dans l'amélioration continue des prévisions liées à la gestion des déchets. Grâce aux données collectées quotidiennement par les drones, le modèle de ML est en mesure de s'adapter en temps réel. Chaque image capturée enrichit la base de données, permettant au modèle de recalibrer ses prédictions en fonction des tendances observées et des évolutions des données. Ce processus d'apprentissage, fondé sur l'analyse des données historiques, garantit une précision accrue des estimations de la masse des déchets. Un des principaux avantages de cette approche est sa capacité à intégrer un volume croissant de données, rendant ainsi les prévisions de plus en plus fiables au fil du temps.

Cette mise à jour continue offre plusieurs bénéfices concrets. Tout d'abord, elle permet de prendre en compte les variations locales et temporelles. Chaque point de collecte possède des caractéristiques uniques influencées par des facteurs tels que le type d'activités locales ou la production spécifique de déchets dans une zone donnée. Grâce au ML, les prévisions peuvent être ajustées individuellement pour chaque point, évitant les approximations basées sur des hypothèses généralisées. De plus, le système améliore les prévisions sur le long terme en détectant des tendances durables. Par exemple, il peut identifier l'augmentation de la densité de population dans un quartier ou un changement dans les habitudes des habitants, comme une hausse des déchets alimentaires, et adapter ses prédictions en conséquence. Enfin, le modèle peut constamment tester et affiner ses approches, en expérimentant différentes configurations ou algorithmes pour garantir des résultats plus précis et adaptés aux données les plus récentes.

Les images collectées par les drones sont ensuite analysées à l'aide d'un modèle de machine learning, plus précisément un modèle d'apprentissage supervisé. Ce dernier repose sur un réseau de neurones convolutifs (CNN) conçu pour effectuer des prédictions continues. En se basant sur des données historiques liées aux déchets, ce modèle de régression apprend à estimer la masse des déchets présents à chaque point de collecte. Il analyse les caractéristiques visuelles des déchets, telles que leur forme, leur taille ou leur texture, pour fournir des estimations précises. Cette méthode, à la fois innovante et efficace, renforce l'efficacité opérationnelle en s'appuyant sur l'intelligence artificielle pour optimiser les processus de collecte.

5 MODELE MATHEMATIQUE

Notre problématique s'inscrit dans le cadre du « problème de routage de véhicules verts avec capacités (GVRP-C) ». Dans ce modèle, chaque véhicule démarre à partir d'un dépôt, collecte les déchets aux différents points de ramassage, puis retourne au dépôt pour décharger la cargaison dans des conteneurs dédiés. L'objectif principal est d'optimiser les trajets en déterminant les itinéraires les plus efficaces pour chaque véhicule. Cette optimisation vise à minimiser le coût total des déplacements, la consommation de carburant, ainsi que les émissions de carbone, en alignant performance économique et respect de l'environnement.

Pour atteindre cet objectif, nous avons intégré ces deux dimensions, économique et environnementale, dans notre modèle. Cette approche permet d'identifier une solution optimale qui réduit simultanément les coûts opérationnels et les impacts écologiques. En ce sens, notre travail va au-delà des solutions traditionnelles en cherchant un équilibre durable entre performance logistique et préservation de l'environnement.

Nous avons développé ainsi un modèle qui surmonte les limites des méthodes proposées dans la littérature. Cette nouvelle démarche reflète notre volonté de proposer une solution plus pertinente et adaptée aux exigences actuelles en matière de gestion logistique et environnementale.

5.1 Notations et variables de décision

Dans notre modèle nous utilisons les notations et variables de décision suivantes.

5.1.1 Les ensembles

• Ensemble des emplacements (*V*)

V = {A, B, C, D, E, F, G, H}

• Ensemble des camions (T)

T = {1, 2, 3}

• Ensemble des périodes de la journée (*P*)

P = {Morning, Afternoon, Night}

5.1.2 Les paramètres

$d_{morning}$, $d_{afternoon}$, d_{night}	Distances par période en km
f_c	Coût du carburant par litre
$f_{kg,i}$	Consommation de carburant de camion i en litres par kg par km
e_i	Emission de CO2 (kg/litre) pour le camion i
C_{CO2}	Coût de taxation par kg de CO2
$v_{kg,i}$	Coût variable par kg pour le camion i
$ft_{kg,i}$	Coût fixe par camion i
$Capacité_camion[i]$	Capacité maximale de charge pour le camion i
$Capacité_carburant[i]$	Capacité maximale de carburant pour le camion i
CC	Coût total de carburant
CE	Coût total des émissions de CO_2
CF	Coût total fixe de transport
CV	Coût total variable de transport
$Ch_{morning}$	Charge des camions le matin
$Ch_{afternoon}$	Charge des camions l'après-midi
Ch_{night}	Charge des camions la nuit

5.1.3 Variables de décision

$X_{morning,i}$	Charge transportée par le camion i le matin
$X_{afternoon,i}$	Charge transportée par le camion i l'après-midi
$X_{night,i}$	Charge transportée par le camion i la nuit

5.2 Fonction objectif

L'objectif global est de minimiser le coût total en prenant en compte plusieurs facteurs. Ce coût total est la somme de différents types de coûts liés à l'exploitation des camions, à savoir : le coût de carburant, le coût des émissions de CO_2 ainsi que les coûts fixe et variable de transport.

Avec :

$$CC = \sum_{i=1}^{N} \begin{pmatrix} X_{morning,i} \times d_{morning} \times f_c \times f_{kg,i} \\ + X_{afternoon,i} \times d_{afternoon} \times f_c \times f_{kg,i} \\ + X_{night,i} \times d_{night} \times f_c \times f_{kg,i} \end{pmatrix}$$

Le coût de carburant est calculé en fonction des distances parcourues pendant les différentes périodes de la journée (matin, après-midi, nuit) et de la consommation de carburant spécifique à chaque camion

$$CE = \sum_{i=1}^{N} \begin{pmatrix} X_{morning,i} \times d_{morning} \times f_{kg,i} \times e_i \\ + X_{afternoon,i} \times d_{afternoon} \times f_{kg,i} \times e_i \\ + X_{night,i} \times d_{night} \times f_{kg,i} \times e_i \end{pmatrix}$$

Le coût des émissions de CO_2 est calculé en fonction des distances parcourues et de la quantité d'émissions de CO_2 généré par camion.

Le coût fixe englobe les dépenses qui ne varient pas avec le volume transporté, comme les coûts d'entretien des camions, les salaires des chauffeurs, ainsi que d'autres frais fixes liés à l'exploitation, comme les assurances et les frais administratifs.

$$CV = \sum_{i=1}^{N} \begin{pmatrix} X_{morning,i} \times v_{kg,i} + X_{afternoon,i} \times v_{kg,i} \\ + X_{night,i} \times v_{kg,i} \end{pmatrix}$$

Le coût variable dépend directement du nombre de camions utilisés et des distances parcourues. Il reflète les coûts liés à la gestion des camions en fonction de la quantité de marchandises transporté

5.3 Contraintes

Les contraintes considérées dans ce problème sont présentées ci-dessous.

Contraintes des charges

$$\sum_{i=1}^{N} X_{morning,i} = Ch_{morning}$$

$$\sum_{i=1}^{N} X_{afternoon,i} = Ch_{afternoon}$$

$$\sum_{i=1}^{N} X_{night,i} = Ch_{night}$$

Chaque période (matin, après-midi, nuit) a une quantité de spécifique marchandises à transporter. Ces contraintes garantissent que la totalité des marchandises à transporter pour chaque période soit prise en charge par l'ensemble des

camions disponibles. En d'autres termes, elles assurent que la capacité de transport de tous les camions combinés est utilisée de manière optimale pour satisfaire les besoins de chaque période de transport.

Contraintes de capacité des camions

$$0 \le X_{morning,i} \le Capacité_camion[i]$$

$$0 \le X_{morning,i} \le Capacité_camion[i]$$

$$0 \le X_{morning,i} \le Capacité_camion[i]$$

Ces contraintes assurent que les quantités transportées par chaque camion sont non négatives (les camions ne peuvent pas transporter des quantités de marchandises négatives) et ne dépassent pas la capacité maximale de chaque véhicule. En clarification, chaque camion doit transporter une quantité de marchandises qui se situe dans un intervalle défini par ses limites de capacité.

Contrainte sur la consommation de carburant

$$\begin{pmatrix} X_{morning,i} \times d_{morning} \times f_{kg,i} \\ +X_{afternoon,i} \times d_{afternoon} \times f_{kg,i} \\ +X_{night,i} \times d_{night} \times f_{kg,i} \end{pmatrix} \le capacité_carburant[i]$$

La consommation totale de carburant, calculée en fonction des distances parcourues et de la consommation spécifique de chaque camion pendant les différentes périodes de la journée, ne doit pas dépasser la capacité maximale de carburant disponible pour chaque camion. Cette contrainte garantit que les camions disposent d'une quantité de carburant suffisante pour effectuer les trajets planifiés sans risque de panne sèche.
Après avoir défini notre modèle mathématique, établi les variables de décision, les contraintes et l'objectif à minimiser, l'étape suivante consiste à passer de la théorie à la pratique en implémentant notre algorithme dans un environnement de programmation.

6 RESULTATS EXPERIMENTAUX

Après avoir modélisé notre modèle mathématique, nous entamons la phase de programmation, durant laquelle nous implémentons cet algorithme dans un langage de programmation adapté. Nous avons choisi d'utiliser le langage Python afin de réaliser nos expérimentations.
Après la résolution du modèle, les variables optimisées $X_{morning,i}$, $X_{afternoon,i}$ et $X_{night,i}$ fournissent la répartition optimale des charges par période et par camion, ainsi que les coûts associés. Le modèle d'optimisation que nous avons développé permet de déterminer la distribution optimale de la charge à transporter sur les différentes périodes de la journée (matin, après-midi, nuit), tout en respectant des contraintes essentielles telles que la capacité des camions en termes de poids, de consommation de carburant et de distance parcourue.
Grâce à cette approche, notre modèle assure une planification efficace des trajets en fonction des périodes, réduisant ainsi les risques de surcharge ou de sous-utilisation des ressources, et contribuant à une gestion optimisée du transport. Les figures 4, 5 et 6 présente les graphiques des itinéraires optimaux. Ils illustrent les trajets optimisés pour chaque période de la journée (matin, après-midi, et soir).
Le premier graphique, représentant l'itinéraire du matin en rouge, montre une distance totale de 7,34 Km. Le graphique de l'après-midi, en vert, présente un itinéraire avec une distance de 8,43 Km. Enfin, le graphique de la nuit, en bleu, indique un itinéraire de 7,05 Km. Étant donné que les itinéraires calculés avec l'algorithme de Dijkstra sont les plus optimaux possibles, les périodes où le trajet nécessite plusieurs camions, leur itinéraire va être réparti entre les véhicules en fonction des charges des points et des capacités de chaque camion.

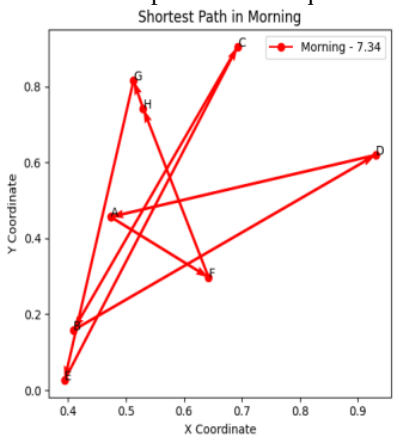


Figure 4. Tournées optimales – matin

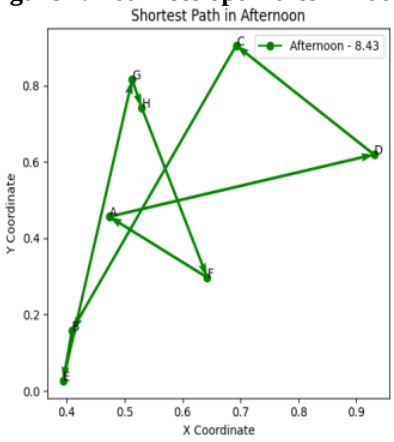


Figure 5. Tournées optimales – après-midi

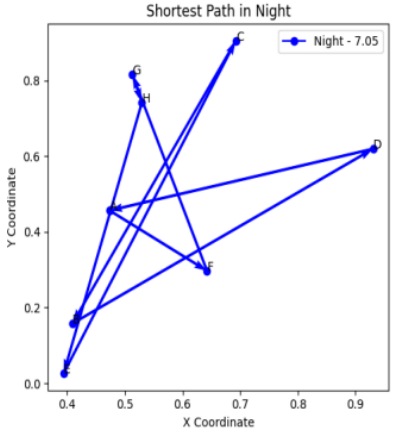


Figure 6. Tournées optimales – soir

Le graphique de répartition de la charge des camions, présenté dans la figure 7, montre la quantité de charge (en Kg) transportée par chaque camion pendant différentes périodes de la journée. Le Camion 1 transporte une charge de 142 Kg exclusivement la nuit. Le Camion 2 transporte 130 Kg l'après-midi et 89 Kg la nuit. Enfin, le Camion 3 transporte toute sa charge de 100 kg le matin. Cette répartition permet d'optimiser l'utilisation des camions en fonction des horaires et des contraintes de capacité.

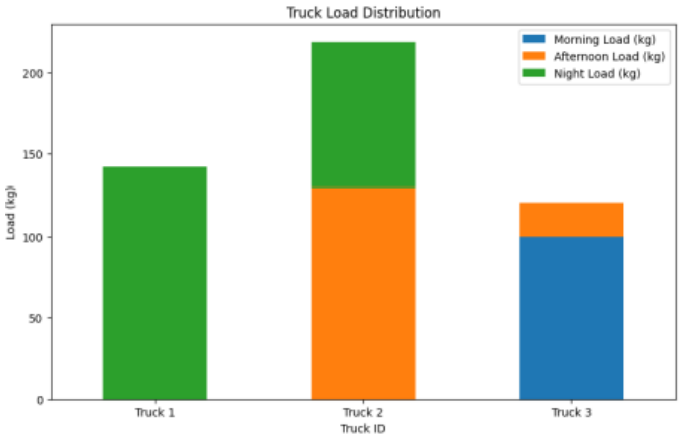


Figure 7. La quantité de charge (en Kg) transportée par chaque camion pendant les différentes périodes de la journée

La figure 8 illustre le graphique de répartition des coûts pour chaque camion montre les différentes catégories de coûts associées à leur fonctionnement. Le coût de carburant (en bleu) est le plus important, ce qui est logique car il dépend directement des distances parcourues et de la consommation de carburant des camions. Le coût des émissions de CO_2 (en vert) est relativement faible par rapport au coût du carburant, mais il reste un indicateur clé pour l'optimisation des camions, visant à réduire l'impact environnemental. Le coût fixe (en orange) englobe des différents coûts liés au transport. Enfin, le coût variable (en rouge) peut inclure des frais supplémentaires, tels que l'entretien imprévu ou d'autres coûts opérationnels changeants.

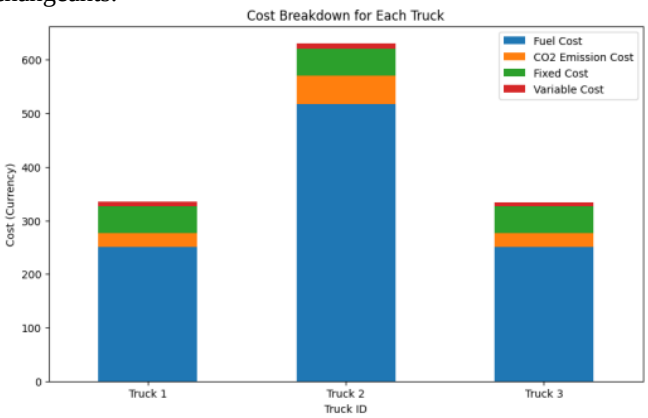


Figure 8. Répartition des différents coûts de fonctionnement pour chaque camion

Le coût total des opérations pour les trois camions est de 2201 unités monétaires (probablement une devise locale). Ce montant englobe l'ensemble des coûts liés aux opérations des camions, incluant le carburant, les émissions de CO_2, les coûts fixes et variables. L'objectif de cette optimisation est de réduire ce total en ajustant les charges transportées par chaque camion ainsi que les itinéraires empruntés, afin de maximiser l'efficacité et minimiser les dépenses

7 Conclusion

Les résultats obtenus à travers notre modèle d'optimisation démontrent une répartition efficace des charges de transport selon les différentes périodes de la journée, tout en respectant les contraintes opérationnelles des véhicules. Cette approche permet non seulement d'optimiser l'utilisation des ressources, mais aussi de réduire les coûts et d'améliorer la gestion globale des flux logistiques.

Dans une perspective future, ce modèle pourrait être enrichi par l'intégration de données en temps réel, permettant d'adapter dynamiquement les itinéraires en fonction des conditions de circulation ou des imprévus. De plus, l'exploration d'algorithmes d'apprentissage automatique offrirait une possibilité d'anticipation et d'amélioration continue des décisions logistiques. Enfin, une extension du modèle à d'autres secteurs, tels que la logistique urbaine ou le transport multimodal, constituerait une piste prometteuse pour renforcer son applicabilité et son impact

8 References

De Morais, C. S. (2022). *Smart Waste Collection Routing Problems: using real-time information for better planning* (Doctoral dissertation, INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO).

Ewert, R., Grahle, A., Martins-Turner, K., Syré, A. M., Nagel, K., & Göhlich, D. (2021). Electrification of urban waste collection: Introducing a simulation-based methodology for technical feasibility, impact and cost analysis. *World Electric Vehicle Journal*, *12*(3), 122.

Gdowska, K., Książek, R., & Korcyl, A. (2019). Fleet optimization for a selective solid waste collection system. *Challanges and Modern Solution in Transportation*, 121-134.

Gutierrez, J. M., Jensen, M., Henius, M., & Riaz, T. (2015). Smart waste collection system based on location intelligence. *Procedia Computer Science*, *61*, 120-127.

Hess, C., Dragomir, A. G., Doerner, K. F., & Vigo, D. (2024). Waste collection routing: a survey on problems and methods. *Central European Journal of Operations Research*, *32*(2), 399-434.

Lu, J. W., Chang, N. B., Liao, L., & Liao, M. Y. (2015). Smart and green urban solid waste collection systems: advances, challenges, and perspectives. *IEEE Systems Journal*, *11*(4), 2804-2817.

Nikouei Mehr, M., & McGarvey, R. G. (2017). Planning Solid Waste Collection with Robust Optimization: Location-Allocation, Receptacle Type, and Service Frequency. *Advances in Operations Research*, *2017*(1), 2912483.

Rodriguez-Melquiades, J., & Cerna, L. R. (2023). Reverse logistics based on green open vehicle routing for waste collection in the urban context. *Pesquisa Operacional*, *43*, e269174.

Varghese, D., Puranik, P., Palamattam, S., & Shaikh, S. (2020, April). Solid waste management: Green index calculation and route optimization. In *2020 3rd International Conference on Communication System, Computing and IT Applications (CSCITA)* (pp. 186-191). IEEE.

Wu, H., Tao, F., Qiao, Q., & Zhang, M. (2020). A chance-constrained vehicle routing problem for wet waste collection and transportation considering carbon emissions. *International journal of environmental research and public health*, *17*(2), 458.

CIGI QUALITA MOSIM 2025

Optimizing Textile Recycling for a Circular Economy: An Integrated Logistics Approach

MOHAMMADMOHSEN AGHELINEJAD[1], ERIC PAPAIN MEZATIO[1,2], LIONEL AMODEO[1]

[1] University of Technology of Troyes
12 Rue Marie Curie, Troyes Cedex, 10004, France

Mohsen.Aghelinejad@utt.fr
eric_papain.mezatio@utt.fr
Lionel.Amodeo@utt.fr

[2] Institut français du textile et de l'habillement (IFTH)
270 Rue du Faubourg Croncels, Troyes, 10000, France

Résumé – L'industrie textile et de l'habillement est l'un des secteurs les plus polluants et gourmands en ressources, contribuant fortement à la consommation d'eau, aux émissions de carbone et à la production de déchets. Le modèle de la fast fashion, caractérisé par des cycles de production rapides et une durée de vie réduite des produits, a amplifié ces défis environnementaux, rendant urgente l'adoption d'alternatives durables. L'économie circulaire apparaît comme une solution prometteuse en limitant les déchets, en optimisant l'utilisation des ressources et en favorisant le recyclage des textiles. Cependant, la mise en place de stratégies de recyclage efficaces et économiquement viables reste un défi en raison de contraintes logistiques, technologiques et économiques.

Les déchets textiles se divisent en deux catégories principales : les déchets pré-consommation et post-consommation. Si les déchets industriels sont souvent réintégrés dans la production, le recyclage des textiles post-consommation demeure complexe en raison de leur hétérogénéité et des difficultés de collecte.

Pour y remédier, nous proposons une approche intégrée combinant logistique directe et inverse, appuyée par un modèle de programmation mathématique (MINLP) pour la planification stratégique et tactique. Une analyse de benchmarking et des expérimentations préliminaires évaluent la complexité et la faisabilité du modèle. Nos résultats contribuent au développement de stratégies durables et rentables pour la gestion des déchets textiles, soutenant ainsi la transition vers une économie circulaire.

Mots clés - Chaîne d'approvisionnement durable, Logistique inverse, Économie circulaire, Industrie textile et de l'habillement.

Abstract – The textile and apparel industry is among the most resource-intensive and polluting sectors, contributing significantly to water consumption, carbon emissions, and waste generation. The fast fashion model, driven by rapid production cycles and short product lifespans, has intensified these environmental challenges, highlighting the urgent need for sustainable alternatives. Circular economy principles offer a promising solution by minimizing waste, optimizing resource use, and promoting textile recycling. However, implementing efficient and cost-effective recycling strategies remains challenging due to logistical, technological, and economic constraints.

Textile waste is broadly categorized as pre-consumer and post-consumer waste. While industrial textile waste is often reintegrated into production, post-consumer waste recycling remains complex due to material heterogeneity and collection inefficiencies. Despite advancements in textile recycling technologies, there is a critical gap in evaluating the life cycle, socio-economic, and environmental impacts of textile waste management.

To address this, we propose an integrated approach combining direct and reverse logistics, supported by a mixed-integer nonlinear programming (MINLP) model for strategic and tactical planning. A benchmarking framework and preliminary experiments assess the model's complexity and computational feasibility. Our findings contribute to the development of sustainable, cost-effective textile waste management strategies, supporting the industry's transition toward a circular economy.

Keywords – Sustainable Supply Chain, Reverse Logistics, Circular Economy, Textile and Apparel Industry.

Risques éthiques dans le management de la performance dans l'Industrie 4.0 : débat et réflexion

LAMIA BERRAH[1], DAMIEN TRENTESAUX[2], FREDERIC GUERRE-CHALEY[3]

[1] LISTIC, Université Savoie Mont Blanc
74944 Annecy France
lamia.berrah@univ-smb.fr

[2] LAMIH UMR CNRS 8201, Université Polytechnique Hauts de France
59313 Valenciennes France
damien.trentesaux@uphf.fr

[3] NTN Europe
1, rue des usines, 74000 Annecy, France
frederic.guerre-chaley@ntn-snr.fr

Résumé – *Cet article présente une synthèse et une analyse d'un débat organisé autour de la prise en compte des risques éthiques dans le pilotage et l'amélioration continue de la performance dans l'Industrie 4.0. Mené auprès d'une trentaine de chercheurs français et canadiens en génie industriel et articulé autour de trois grandes questions, ce débat avait pour objet une confrontation d'idées autour du sujet, à des fins de sensibilisation à l'urgence de doter les managers soucieux de garantir la performance de leurs systèmes d'outils permettant une prise en compte opérationnelle de ces risques dans leurs processus de pilotage et d'amélioration continue ; en complément des cadres règlementaires mis en vigueur à des niveaux politique et stratégique et dont le périmètre n'intègre pas le système industriel. Après un bref retour sur la notion de performance et son évolution, les objectifs du débat et le contexte de sa mise en œuvre sont présentés. Ils sont suivis d'une synthèse ainsi que d'une analyse des réponses obtenues, qui soulignent le besoin de revisiter la notion de performance en dépassant son cadre taylorien et courtermiste et de montrer que la prise en compte des risques éthiques de l'Industrie 4.0 garantit une amélioration de la performance à long terme.*

Abstract – *This paper presents a synthesis and an analysis of a recent debate on the integration of ethical risks into the management and continuous improvement of performance in Industry 4.0. The aim of the debate, which brought together around thirty French and Canadian industrial engineering researchers and was structured around three main questions, was to compare ideas on the subject and raise awareness of the urgent need for managers concerned with guaranteeing the performance of their systems to be provided with tools enabling these risks to be taken into account operationally in their management and continuous improvement processes; in addition to the regulatory frameworks in place at political and strategic levels, the scope of which does not include the industrial system. After a brief review of current performance improvement practice, the objectives of the debate and the context in which it was held are presented. This is followed by a synthesis and analysis of the responses collected, which underline the need to revisit the notion of performance by going beyond its Taylorian and short-term framework, and to show that taking into account the ethical risks of Industry 4.0 guarantees improved performance in the long term.*

Mots clés – **Performance industrielle, Amélioration continue, Industrie 4.0, Risques éthiques, Débat.**
Keywords – **Industrial performance, Continuous improvement, Industry 4.0, Ethical risks, Debate.**

1 INTRODUCTION

Par l'introduction des technologies avancées comme l'IA (Intelligence Artificielle) et en particulier les LLM (*Large Language Model* – Grand Modèle de Langage), l'IoT (*Internet of Things* - Internet des Objets), les systèmes industriels, partiellement automatisés, se transforment en systèmes connectés, autonomes et intelligents [Culot et al., 2020] [Elnadi et Abdallah, 2024]. Durant leur exploitation, cette transformation permet une optimisation immédiate de la performance, en termes de productivité, qualité et délai et de traçabilité, renforçant l'efficacité du pilotage des processus industriels.

L'usage des technologies avancées est en pleine expansion et s'accélère. Les technologies sont très vite adoptées, laissant imaginer de nouvelles fonctionnalités, qui dépassent les capacités humaines, tout en ignorant la portée de cette utilisation. En effet, la focalisation sur les améliorations tangibles de la performance, dans une vison techno-centrée et à court terme suscite des questionnements, en particulier sur la prise de risques éthiques engagée [Rahanu et al., 2021]. Ces risques éthiques peuvent apparaître à plusieurs niveaux [Trentesaux et al., 2024] : 1°) humain (nouveaux rôles, démotivation, pertes de compétences, remplacement) ; 2°) entreprise (image, qualité de vie, décisions prises hors conditions de routine, cyber-attaques) ; 3°) société (valeurs humanistes, transformation des métiers et des emplois) ; 4°) environnement (rareté des matériaux, consommation énergétique).

Si les risques éthiques en lien avec l'usage massif et accéléré des technologies avancées sont aujourd'hui relativement bien connus et si l'ensemble des citoyens y est assez sensibilisé, la question de leur prise en compte reste en suspens. Cadres et réglementations sont mis en place à des niveaux politiques et

stratégiques, tels quel la responsabilité sociétale des entreprises (RSE) [Agudelo et al., 2019], le règlement général sur la protection des données (RGPD). Cependant, les réponses fournies par les cadres et législations en vigueur restent très partielles et évoluent beaucoup moins vite que les technologies. En particulier, les réponses opérationnelles concernant l'exploitation des systèmes industriels restent rares. Ceci s'explique par le manque de vision globale, l'absence d'offres qui répondent concrètement aux besoins des entreprises et aussi par une méconnaissance des rôles de chaque acteur dans le processus de prise en compte des risques éthiques. Les décideurs en charge du management de la performance des systèmes industriels se retrouvent ainsi sans réponse face à leur question : Comment améliorer la performance tout en se préservant des risques éthiques ?

Cet article a pour objet la sensibilisation et le questionnement de notre communauté de chercheurs en génie industriel (GI) à cette question. Il retranscrit une synthèse et une analyse du débat tenu auprès d'une trentaine de chercheurs et soutenu par le comité technique (CT) IMS², lors du deuxième congrès annuel de de la SAGIP (Société d'Automatique, de Génie Industriel et de Productique) [SAGIP, 2024] [Berrah et al., 2025]. Le débat confronte les deux concepts, celui bien maîtrisé de performance industrielle d'une part et celui d'éthique d'autre part, concept issu de la philosophie morale. Délicat à appréhender dans le milieu de l'ingénierie, l'éthique est considérée dans ces travaux au travers des risques associés. L'idée est de chercher à augmenter notre conscience quant à l'urgence de prendre en compte ces risques et faire ressortir des pistes de réflexion à développer pour cette prise en compte. Dans ce sens, la section 2 propose un bref retour sur la performance et de son évolution. La section 3 adresse quelques éléments de contextualisation et de méthodologie du débat. Les résultats obtenus sont alors synthétisés et analysés en section 4. Une conclusion et des perspectives finalisent cette réflexion.

2 MANAGEMENT DE LA PERFORMANCE

2.1 Généralités

Déployé selon les niveaux décisionnels de l'entreprise (stratégique, tactique, opérationnel et temps-réel), le management de la performance industrielle identifie l'ensemble des dispositifs mis en place pour garantir la performance des systèmes industriels, durant leur exploitation. Il vise en particulier son amélioration continue.

Le management de la performance s'est fondé sur le postulat de devoir vérifier les trois conditions qui constituent le triangle (efficience, efficacité, effectivité) de la performance [Gilbert et al., 1980] (Figure 1) :

- l'efficience dans l'utilisation des moyens du système ;
- l'efficacité des processus mis en œuvre pour l'atteinte des objectifs assignés au système ;
- l'effectivité (ou pertinence) des objectifs au regard des moyens disponibles.

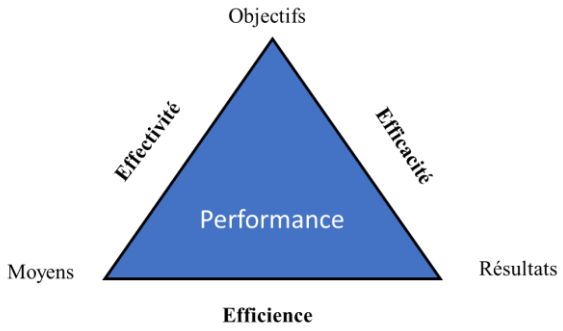


Figure 1. Le triangle de la performance 3.0 [Gilbert et al., 1980]

Le management de la performance industrielle a ainsi pour objet le pilotage des plans d'action mis en place pour l'atteinte des objectifs assignés au système industriel et l'amélioration continue des résultats obtenus, sur la base des moyens disponibles [Bititci et al., 2016] [Vinodh et al., 2021]. Multicritère, les objectifs industriels sont traditionnellement associés au triangle Coût-Qualité-Délai [Ding, 2021]. Les plans d'action sont définis au sens des quatre étapes de la roue de Deming (Plan – Do – Check – Act).

2.2 Le management de la performance dans l'Industrie 4.0

Sans en remettre en cause les fondamentaux et les cadres existants, l'intégration des technologies avancées est considérée comme amenant de nouvelles opportunités en matière de management de la performance des systèmes industriels et des chaînes logistiques [Marbun et al., 2024], renforçant les conditions du triangle de la performance. Permettant encore plus de réactivité et de traçabilité et réduisant les erreurs pouvant être provoquées par des prises en charge humaines, ces opportunités se trouvent dans : 1°) la transformation numérique du mode de management [Cosa et Torelli, 2024] ; 2°) le développement de systèmes d'aide à la décision intelligents [Varma et al., 2024] et l'apport des LLM [Bankar et Shubka, 2023] ; 3°) la mise en place des indicateurs de performance [Lopes et Martins, 2021] ; 4°) l'impact des technologies sur l'atteinte des objectifs [Büchi et al., 2020] ou 5°) l'impact de ces technologies sur la traçabilité des données [Hawashin et al., 2024].

2.3 Prise en compte de l'éthique

L'éthique est un concept issu de la philosophie morale, dont la définition suivante : « une vie bonne, avec et pour autrui, dans des institutions justes » [Ricœur, 2015] peut traduire la sémantique d'une manière assez simple. Plusieurs courants philosophiques considèrent le concept de l'éthique sous différents angles et conduisent à la construction de paradigmes relativement différents dans leur conception de l'éthique, comme par exemple, la déontologie, ou l'éthique du « devoir » et le conséquentialisme, incluant l'utilitarisme. Trouvant un écho en ingénierie, Le paradigme déontologique repose sur un principe de prise de décision sur la base de règles immuables tandis que le paradigme utilitariste repose sur un principe de prise de décision sur la base des possibles conséquences éthiques [Bergmann et al., 2018]. Associer un déploiement opérationnel de l'éthique au management de la performance permet selon nous une garantie de la performance à long terme des entreprises et donc sa durabilité.

En effet, sans être explicitement prise en compte dans le management de la performance des systèmes industriels, la dimension éthique commence néanmoins à y être abordée, l'Industrie 4.0 transformant les rôles et les modes opératoires des humains impliqués. Les risques éthiques et leurs impacts

sont discutés [Shayganmehr et al., 2021] [Trentesaux et Caillaud 2020]. Néanmoins, vu la nature de l'éthique et le fait que ce ne soit pas un élément intégré dans le cahier des charges fonctionnel traditionnel, sa corrélation avec la performance et sa prise en compte opérationnelle restent encore confidentielles et sont soumises à conditions, comme le soulignent les résultats du débat présentés ci-après.

3 ELEMENTS METHODOLOGIQUES

3.1 Contexte

Le débat analysé dans cet article s'inscrit dans le cadre du projet ANR ETHICS40 « Management des risques éthiques dans l'Industrie du Futur » (ANR-236CE1060014) (https://ethics40.fr/). C'est le deuxième d'une série de débats que les partenaires du projet envisagent d'organiser le long du projet. Les objectifs attendus des débats du projet ETHICS40 sont multiples (Figure 2). Ils concernent essentiellement la sensibilisation de la communauté à l'urgence de prendre en compte les risques éthiques liés à l'usage des technologies avancées de l'Industrie 4.0 dans le développement des méthodes et modèles proposés aux partenaires industriels. Il en est également attendu la mise en avant de de pistes de recherche permettant d'avancer rapidement sur la question, pour fournir au monde industriel des outils permettant une prise en compte concrète et opérationnelle de ces risques éthiques. Il est précisé aux participants, lors de ces débats, qu'une restitution sera proposée à la communauté sous la forme de communications dans des conférences francophones du domaine du GI.

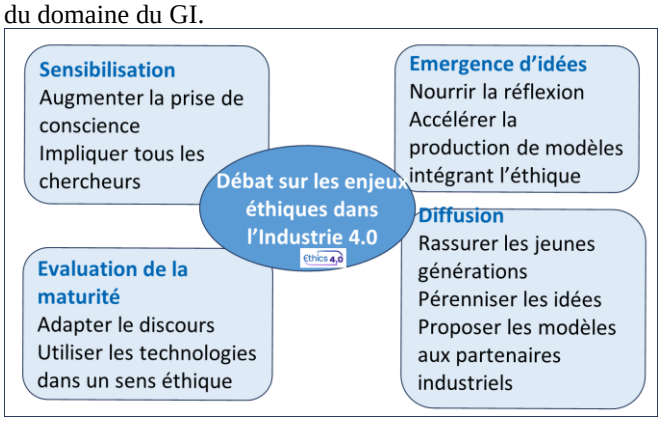


Figure 2. Objectifs des débats du projet ETHICS40

Le premier débat du projet s'est tenu le 27 septembre 2023 et a mobilisé une quinzaine de participants [Berrah et al., 2024a]. Il a porté sur le sujet global des risques éthiques dans l'Industrie 4.0. Organisé en deux temps, le premier temps du débat était focalisé sur la réflexion sur des dilemmes éthiques extraits de l'actualité industrielle. Le second temps était articulé autour d'une démarche questionnaire, basée sur six questions visant l'auditoire à se questionner sur le concept d'éthique et la manière dont elle est prise en compte. Ce premier débat a confirmé l'importance du sujet et la difficulté pour chacun, enseignant, chercheur ou industriel à prendre en compte à titre personnel ou professionnel une dimension éthique dans son activité à court, moyen et long termes.

3.2 Méthodologie pour le deuxième débat

Plus ciblé que le premier, le deuxième débat a porté sur la question de la prise en compte des risques éthiques dans le pilotage et l'amélioration continue de la performance dans l'Industrie 4.0. L'objectif était une confrontation d'idées autour du sujet. Proposé à une trentaine de chercheurs en GI (32), le débat a été structuré en trois parties (Figure 3). La première partie, sur 15 minutes, a concerné une discussion sur la performance, telle qu'elle a été définie dans l'Industrie 3.0 et le besoin d'en revisiter le pilotage et l'optimisation dans l'Industrie 4.0. Sur 30 minutes, la deuxième partie du débat a été dédiée à la réflexion sur le sujet des risques éthiques, par le biais d'une démarche également fondée sur un questionnaire. Les trois questions proposées à l'auditoire ont été introduites ainsi que les temps et mode réponse proposés :

- *Q1 : Est-il possible pour une entreprise d'être performante et éthique à la fois ?*
- *Q2 : Quels sont les plus grands risques éthiques liés à l'optimisation de la performance des systèmes industriels du Futur ? Quelle en est la portée ?*
- *Q3 : Comment mesurer l'éthique durant l'exploitation des systèmes industriels du Futur ?*

Un dernier temps, sur 15 minutes, a été consacré à un débrief préliminaire à l'analyse des réponses aux questions. Celles-ci ayant été, dans un souci de simplicité, collectées par le biais de post-its, de couleur différente, chaque couleur correspondant à une question (Figure 4). Ces questions ne prétendent pas couvrir l'ensemble du périmètre des risques éthiques dans le pilotage et l'amélioration continue de la performance dans l'Industrie 4.0. Elles ont été choisies et définies de sorte à étudier spécifiquement trois aspects :

- La possible corrélation entre les concepts d'éthique et de performance ;
- la possible nécessité d'une prise de conscience des risques éthiques dans le pilotage et de l'amélioration continue de la performance ;
- l'étude et la pertinence des moyens à mettre en œuvre pour mesurer l'éthique dans le pilotage et l'amélioration continue de la performance.

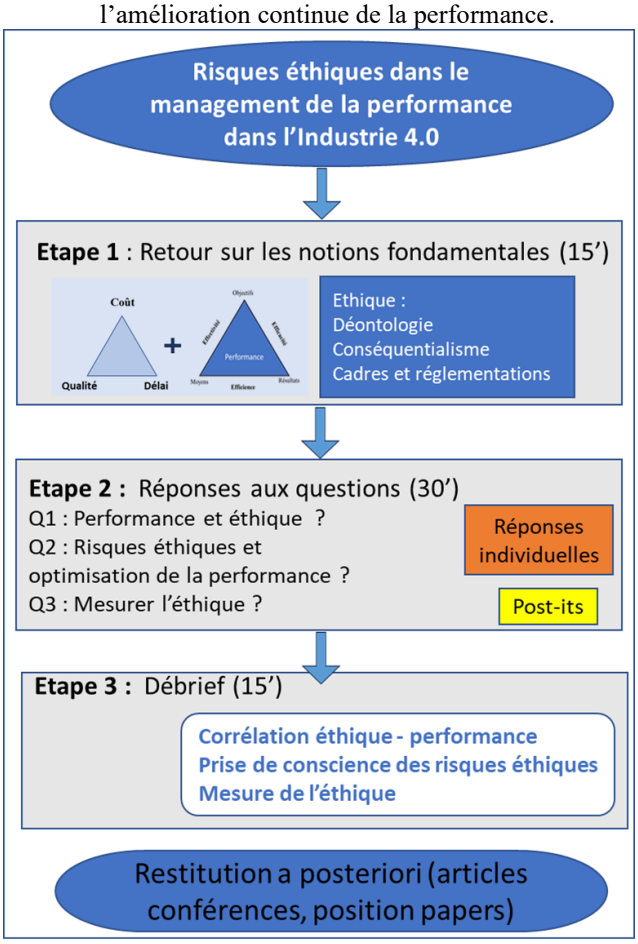


Figure 3. Méthodologie développée pour le deuxième débat

4 SYNTHESE DES RESULTATS ET ANALYSE QUALITATIVE

Cette section reprend les réponses données à chacune des questions (Figure 4). Une synthèse par question est proposée dans un premier temps puis une analyse qualitative est menée dans un second temps par les auteurs de cet article. Il est important de noter un biais dans les réponses obtenues dans la mesure où l'ensemble des participants sont chercheurs en GI, ce qui restreint les points de vue sur le sujet.

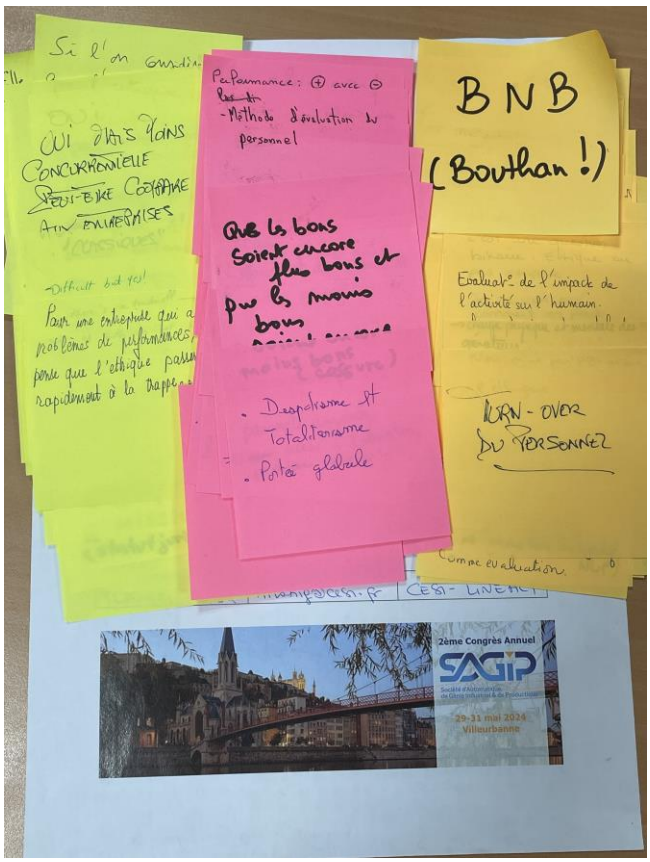


Figure 4. Les réponses aux trois questions du débat

4.1 Q1 : Est-il possible pour une entreprise d'être performante et éthique à la fois ?

Cette question va permettre d'étudier dans quelle mesure performance et éthique sont perçues de manière complémentaire ou antagoniste par les chercheurs en GI, habituellement rompus à l'analyse de la performance industrielle.

4.1.1 Synthèse des résultats pour Q1

Poser cette question avait provoqué un effet de surprise, l'association de la performance et l'éthique semblant relever du non-sens. Néanmoins, 32 réponses ont pu être collectées. La majorité des réponses vont dans le sens d'une corrélation entre la performance et l'éthique (29 sur 32). Très peu de réponses en effet vont dans le sens contraire (3 sur 32), considérant dans ce cas l'éthique comme une contrainte déontologique seulement ou comme une notion à sacrifier au profit de la performance.

En revanche, pour certains chercheurs, cette corrélation est évidente (4 sur 32), la performance n'étant pas une quête qui empêcherait l'entreprise d'avoir des valeurs (sociales et environnementales), ou souhaitable (6 sur 32). Dans ce cas, l'éthique serait non pas une contrainte mais une sorte de garde-fou qui obligerait les entreprises à respecter les lois. L'éthique peut également devenir un « outil marketing », à même de promouvoir la performance, une condition au « bonheur » en entreprise ou un vecteur d'amélioration de la performance, notamment en lien avec l'instauration d'une confiance entre les opérateurs. Enfin, pour d'autres chercheurs (2 sur 32), cette corrélation est un élément qui pourrait être envisagé, considérant que l'éthique pouvait contribuer à la performance, partiellement ou totalement.

Toutefois, la majorité des réponses ne tiennent pas pour acquise la corrélation performance-éthique (17 sur 32) et y font apparaître des conditions décrites dans le Tableau 1.

Tableau 1. Les conditions pour une corrélation performance-éthique

Condition	Description	Nombre de réponses
Mode de gouvernance de l'entreprise : Stratégie Cadre économique et législatif Et secteur d'activité	- Intégration des considérations éthiques dans les objectifs. - Définition des stratégies concurrentielles moins offensives - Adoption d'une équité salariale - Différences dans les mises en œuvre selon le secteur d'activité - Unanimité de la démarche de toutes les entreprises du secteur d'activité	8
Compromis	- Contradiction entre éthique et performance (paradigme productiviste) - Temporalité longue pour une démarche éthique impliquant une dégradation de la performance à court terme dans un premier temps	4
Mesure	- Développement d'un Total Ethics Management (TEM) - Intégration opérationnelle et à tous les niveaux de bonnes pratiques - Proposition d'un indice d'éthique et de nouvelles mesures - Mesure de la performance à long terme	5

Par ailleurs, limiter l'intervention humaine dans l'industrie semblerait, étonnamment, aller dans le sens de cette corrélation.

4.1.2 Analyse des résultats pour Q1

La première conclusion que nous pouvons tirer des réponses à cette première question et conformément au premier aspect sur lequel les auteurs voulaient débattre (cf. §3.2), est que l'association de la performance et de l'éthique n'est pas systématique et suscite réflexion. On pense que l'éthique dégraderait la performance et peut-être vice-versa. Le besoin d'élargir les visions que l'on a dans la communauté des deux notions mises en avant (la performance d'une part et l'éthique d'autre part) est confirmé. L'éthique reste ici identifiée aux cadres légaux et déontologiques (donc adossée à une vision long terme) tandis que la performance reste productiviste et courtermiste. Il nous semble dès lors possible d'aller vers une

définition de la performance qui ne l'oppose pas avec le concept d'éthique si on considère différents horizons temporels. Il apparaît également intéressant d'intégrer, lors du déploiement d'une démarche éthique, les spécificités de l'entreprise, son mode de gouvernance et son secteur d'activité. Par ailleurs, la question du compromis à trouver entre la performance et l'éthique reste posée. Si elle semble paradoxale dans le sens de l'éthique vers la performance, elle prend tout son sens dans le sens de la performance vers l'éthique (voir [Berrah et al., 2024b] pour une discussion à ce sujet). Enfin, il peut être noté que la performance ne pouvant être dissociée de sa mesure, son association à l'éthique pose également la question de cette mesure, ce que nous verrons ultérieurement dans cet article.

Les réponses obtenues permettent ainsi d'argumenter les trois corrélations possibles (et très globales) entre performance et éthique (Tableau 2) : corrélation nulle (aucune influence réciproque), corrélation positive (performance et éthique contribuent positivement l'un par rapport à l'autre) et enfin, corrélation négative (performance et éthique sont antinomiques et contradictoires).

Tableau 2. Corrélations Performance-Ethique

Corrélation	Arguments en faveur de la corrélation
Positive	L'éthique impose une vision stratégique de l'entreprise qui peut alors aligner sa performance à long terme sur cette stratégie
Nulle	Les enjeux de la performance sont essentiellement à court terme (coût, délai, qualité), l'éthique avec une vision déontologique à long terme n'influe en rien sur cette performance.
Négative	Une vision éthique est prioritaire, quitte à brider la performance industrielle et la compétitivité des entreprises L'entreprise cherche la performance d'abord, elle peut prendre le luxe d'appliquer une démarche éthique si tout va bien en son sein. L'éthique n'est pas urgente si la performance n'est pas bonne.

Un point intéressant réside dans le fait que la corrélation positive soit plutôt relative au long terme alors que la corrélation négative soit plutôt en lien avec la vision courtermiste. De ce fait, l'éthique pourrait alors être vue comme une visée stratégique à long terme pour une entreprise, quitte à ce qu'à court terme, son application puisse amener à une réduction de la performance en termes de coût, délai et qualité. Un autre aspect intéressant concerne la dynamique d'application d'une démarche éthique au sein d'une entreprise. Il est en effet possible qu'à certains moments, la mise en œuvre d'une vision de l'éthique soit gelée voire annulée en fonction de la performance (dans le cas de la corrélation négative). Une vision lexicographique s'applique alors : la performance d'abord, l'éthique ensuite. Cette vision associe la volonté de la mise en œuvre d'une démarche éthique avec une mesure de la santé d'une entreprise. Dans ce cas, l'éthique est assimilée à un luxe qu'une entreprise en bonne santé (performance) peut se permettre, mais qui disparait au moindre signe de mauvaise santé (économique typiquement).

4.2 Q2 : Quels sont les plus grands risques éthiques liés à l'optimisation de la performance des systèmes industriels du Futur ? Quelle en est la portée ?

Cette question va permettre une estimation de la prise de conscience des risques éthiques en vue de leur prise en compte potentielle dans le développement de modèles d'optimisation dont cette communauté est spécialiste.

4.2.1 Synthèse des résultats pour Q2

Remettre en cause l'optimisation a semblé curieux et quasi-antinomique avec l'essence de la recherche en GI. Cela n'a pas empêché que 32 réponses aient été collectées également. Si très peu de chercheurs (3 sur 32) n'ont fait qu'appuyer l'hypothèse de la présence de risques éthiques lors de la recherche de l'amélioration de la performance dans le contexte de l'Industrie 4.0, la majorité d'entre eux vont non seulement dans le sens de cette prise de conscience mais vont jusqu'à lister un certain nombre de risques éthiques (Tableau 3).

Tableau 3. Risques éthiques

Description du risque éthique	**Conséquences du risque éthique**	**Nombre de réponses**
Evolution du rôle de l'humain, Bien-être et Remplacement : Déshumanisation du travail et négligence des capacités de l'humain	- Mode de coopération Homme-Machine - Equilibrage de charge - Augmentation du taux de rotation des effectifs - Perte de sens - Pression - Perte d'emploi	23
Respect de la vie privée : Usage abusif des données personnelles	- Partage des données avec une IA - Cyber-attaques	5
Consommation d'énergie, eau et matière	- Epuisement des ressources	4
Performance : Négligence de certaines dimensions au profit de la rentabilité « Fair trade »	- Dégradation de la performance globale - Dissonance chez les parties prenantes	3

Selon les chercheurs interrogés, la portée de ces risques éthiques est à la fois le système industriel, l'entreprise et la société de façon plus générale. Concernant le système industriel, il a été mentionné que les méthodes d'évaluation du personnel pouvaient entraîner une discussion sur les performances individuelles, ce qui pourrait générer des risques juridiques et éventuellement créer un climat caractérisé par une perte du sens du collectif, du manque de respect et de la méfiance entre les travailleurs. Cette cascade aurait pour effet, à terme, une baisse de la productivité individuelle et donc de la performance. Par ailleurs, les risques éthiques qui concernent l'entreprise ont essentiellement été rattachés à son image de marque et à son attractivité, notamment par rapport aux nouvelles générations qui sont plus sensibilisées aux sujets d'éthique, de bien-être, de responsabilité, etc. Enfin, au niveau sociétal, ces risques éthiques ont été considérés comme pouvant engendrer une forme d'exploitation des travailleurs les plus démunis, une aggravation de la pauvreté, une limitation de l'accès à l'éducation, et, in fine, une cassure dans la société et des problèmes sociaux. Les termes « despotisme » et

« totalitarisme » ont été employés, et la tendance à l'émergence de l'effet « billionaires » a été évoquée.

4.2.2 Analyse des résultats pour Q2

La première conclusion que nous pouvons tirer des réponses à cette deuxième question et conformément au deuxième point sur lequel les auteurs voulaient débattre (cf. §3.2), est que la conscience des risques éthiques en lien avec l'optimisation de la performance est présente. Plusieurs niveaux d'impact sont envisagés, à savoir le système industriel, l'entreprise et la société. Le verrou majeur est lié à la menace pour l'humain.

Il est cependant nécessaire de relativiser ces craintes et se placer dans un contexte plus global (Figure 5). On remarque en effet que les risques identifiés par les chercheurs interrogés sont essentiellement des risques à court terme (disparition des emplois, consommation énergétique, etc.).

Par conséquent, cette analyse doit s'accompagner d'une réflexion à plus long terme. Typiquement, les métiers ont toujours eu un cycle de vie aligné avec ceux des produits et des technologies, à savoir : apparition, développement, maturité, déclin, disparition. Il suffit de voir les évolutions des métiers au fil des révolutions industrielles, et ce, dans tous les secteurs d'activité (par exemple, mécanique, agriculture, service plus récemment). Celle que nous vivons actuellement en est juste une de plus. Une transformation toutefois est notable dans ce cycle d'apparition/disparition des métiers, c'est celle de l'accélération des développements technologiques (push) ainsi que des besoins de la société et des personnes (pull). Les métiers apparaissent et disparaissent de plus en plus vite, de manière de plus en plus incontrôlée et c'est à ce niveau que les risques éthiques apparaissent véritablement. Il suffit pour s'en rendre bien compte de considérer par exemple la dynamique des formations professionnalisantes post-bac par rapport à l'évolution par exemple de l'IA Générative (cinq ans sont nécessaires pour former un ingénieur sur un programme de formation défini cinq ans avant), ou encore l'apparition journalière de nouveaux métiers dans les demandes de recrutement, une illustration flagrante en étant celle du « prompt engineer ».

Il en va de même avec le choc des cultures et des générations. Toute génération montante a tendance à rendre obsolète les évolutions de la génération de ses parents et grands-parents. Cela a toujours été vrai. Mais de manière similaire à la dynamique des cycles de vie des métiers, la dynamique sans cesse de plus en plus rapide et incontrôlée de l'évolution des technologies va accentuer cette obsolescence et va même potentiellement l'instaurer en intra-générationnel : un informaticien de 30 ans se considère déjà dépassé par un « jeune » informaticien de 25 ans.

De ce fait, il nous semble que les risques ne soient pas tant sur la disparition des métiers, qui sont accompagnés de la création de nouveaux métiers, avec certes une tendance à l'accélération de l'automatisation. Il est en effet nécessaire de distinguer un risque éthique d'une résistance au changement qu'il est indispensable toutefois d'accompagner. Les risques éthiques sont davantage liés à la difficulté de la société, à tous les niveaux (entreprise, organismes de formation, réglementations…), de par sa dynamique plus lente à absorber et intégrer ces cycles d'apparition/disparition qui s'accélèrent. D'où le sentiment de décrochage et de populations, de générations plus ou moins qualifiées que l'on a peur de voir laissées « sur le carreau ». Ces conclusions vont bien dans le sens de la nécessité de nous impliquer tous, avec des approches et à des degrés à définir, dans la prise en compte de ces risques éthiques.

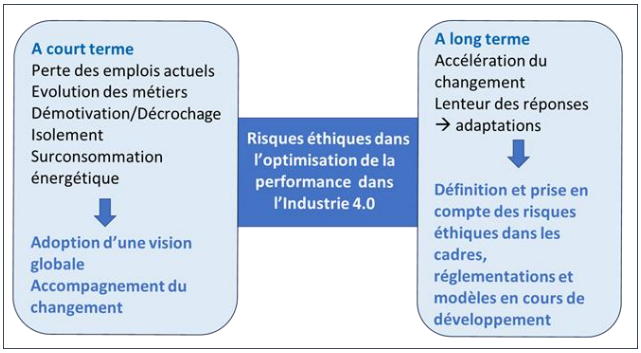


Figure 5. Vision globale des risques éthiques en lien avec l'optimisation de la performance dans l'Industrie 4.0

4.3 Q3 : Comment mesurer l'éthique durant l'exploitation des systèmes industriels du Futur ?

Cette question va permettre d'étudier la possibilité de mesurer l'éthique, voire de la quantifier, en vue de l'intégrer dans le mangement de la performance et d'orienter les développements d'outils et de modèles à venir.

4.3.1 Synthèse des résultats pour Q3

La question de la mesure de l'éthique a été jugée pertinente, à l'unanimité. 31 réponses ont pu être collectées. Si la grande majorité des réponses va vers une mesure possible de l'éthique (26 sur 31), certains chercheurs pensent que cette mesure est difficile, voire impossible (5 sur 31). Plusieurs raisons sont évoquées en ce sens : 1°) la complexité de la notion, 2°) son large périmètre, 3°) sa dimension politique et 4°) la difficulté d'en avoir une définition universelle. En effet, l'éthique étant vue comme l'étude de la morale et la morale étant relativement propre à chacun, il manquerait un référentiel commun pour établir un système de mesures. L'éthique aura également été intuitivement définie comme étant « faire les bonnes choses de la bonne manière », en écho avec la définition de P. Ricoeur [Ricoeur 2015] (cf. § 2.3). L'enjeu de définir des indicateurs rattachés à la mesure de l'éthique tout en respectant la préservation des informations personnelles a été également soulevé. On pourrait alors imaginer tout au plus que les objectifs puissent être déclarés en cohérence avec un positionnement éthique, ou que l'éthique puisse être appréhendée de manière locale et partielle.

Le mode de mesure de l'éthique demeure une vraie question pour les chercheurs interrogés, revenue à plusieurs reprises. Les valeurs éthiques de l'entreprise ainsi que son alignement stratégique, notamment sa loyauté vis-à-vis de la concurrence, ont été énoncés comme prérequis à la définition d'indicateurs associés à l'éthique.

Plusieurs approches pour mesurer l'éthique sont supposées possibles. Pour un chercheur, l'éthique étant binaire, sa mesure se fait nécessairement sur l'ensemble {0,1}, dans le sens où l'entreprise est éthique ou n'est pas éthique, et qu'une valeur de « 25% » par exemple n'aurait pas de sens. En revanche, la vision progressive a été également suggérée, sur la base du développement d'un modèle de maturité éthique. Cette vision fait écho à des réflexions menées par les auteurs, sur l'idée de considérer l'éthique comme un critère de performance, par rapport auquel des démarches d'amélioration peuvent être envisagées [Berrah et Trentesaux, 2021].

La mesure de l'éthique est vue comme le résultat de la comparaison des pratiques aux « valeurs morales ». Plusieurs indicateurs, à considérer plus ou moins conjointement, sont mis en avant par un grand nombre de chercheurs (22 sur 31), tels que : le taux de rotation du personnel, la difficulté d'embauche, l'absentéisme, le taux de rétention des clients, le

bien-être/bonheur au travail, la satisfaction au travail, la motivation du personnel au regard de l'atteinte des objectifs, l'impact de l'activité sur l'humain, la charge physique et mentale des opérateurs, l'inclusion, l'égalité salariale, l'impact environnemental. Certains chercheurs vont même jusqu'à évoquer la notion de sécurité.

Les modes de mesure ont été néanmoins très peu explicités, cette mesure étant vue comme étant subjective, plus ou moins directe. Les techniques d'audit ont été également suggérées ainsi que des approches qualitatives (questionnaires et grilles d'analyse, enquêtes QVT, mesures de ressenti et feedbacks, tables rondes…). La question de l'horizon temporel est posée, dans la mesure où les approches de mesure peuvent en dépendre.

Optant pour des approches plus globales ou émettant des pistes de réflexion (5 sur 31), certains chercheurs proposent des analogies, comme avec le BNB (Bonheur National Brut, Bhoutan) ou le Sentence Embedding, ou de recourir à l'IA et aux techniques d'apprentissage pour effectuer des mesures de l'éthique. Plus en lien avec les actions à mettre en œuvre, la piste de la cartographie des risques éthiques a été suggérée, en cohérence encore une fois avec des travaux antérieurs des auteurs [Trentesaux, 2021]. Il a été également recommandé d'intégrer dans l'évaluation de l'éthique l'ensemble des parties prenantes.

4.3.2 Analyse des résultats pour Q3

La première conclusion que nous pouvons tirer des réponses à cette troisième question et conformément au troisième point sur lequel les auteurs voulaient débattre (cf. §3.2), est que la mesure de l'éthique est considérée comme possible mais difficile, partielle. La vision de l'éthique reste essentiellement déontologique, incluant les dimensions sociale et environnementale. La mesure de l'éthique est plutôt vue comme déconnectée de l'amélioration de la performance. Des idées intéressantes sont apparues néanmoins, en lien avec l'adoption d'une approche globale de l'éthique, le développement d'un modèle de maturité des systèmes industriels en matière d'éthique et l'identification préliminaire des risques éthiques.

L'éthique est un concept philosophique étudié depuis plus de 2000 ans (Aristote), présentant différentes facettes (moralité, équité, bonheur…), sujets (éthiques du citoyen, d'un professionnel, d'une institution) et courants de pensée (déontologie, vertu, utilitarisme…) (cf. §2.3). Le concept d'éthique opérationnelle est quant à lui beaucoup plus récent et est lui-même sujet à discussion (pour certains philosophes, il n'est pas possible de rendre opérationnel le concept d'éthique). Il ouvre ainsi la voie au concept de méta-éthique portant sur une analyse globale de l'essence même du concept d'éthique et de ses fondamentaux.

Définir une mesure d'un degré d'éthique semble peut-être dès lors inatteignable (Figure 6), impossible voire même un non-sens. Cependant, au travers des réponses reçues pour cette question et de discussions que les partenaires du projet ETHICS40 tiennent régulièrement avec différents industriels, partenaires et collègues, le besoin de quantifier ou de rendre opérationnel ce concept apparaît clairement, même si cela impose de réduire son essence ou sa portée, tout en acceptant qu'il n'est pas possible d'avoir la mesure idéale, optimale et universelle d'un degré d'éthique. Se pose dès lors la question : vaut-il le coup de s'attacher à cette tache a priori impossible quitte à réduire fortement l'essence même du concept initial ? Il nous semble que oui. Et pour nous accompagner dans cet exercice, il est alors possible d'adopter une démarche pragmatique par amélioration successive visant un équilibre entre complexité et richesse du concept éthique et capacité à manipuler des indicateurs quantifiés de manière simple et lisible par les utilisateurs. L'enrichissement des indicateurs au fil du temps (et leur remise en question), adossé à une gestion de la maturité de ce transfert « philosophie vers application » offrirait aux entreprises un outil de management de leurs risques éthiques qui se perfectionnera au fil du temps.

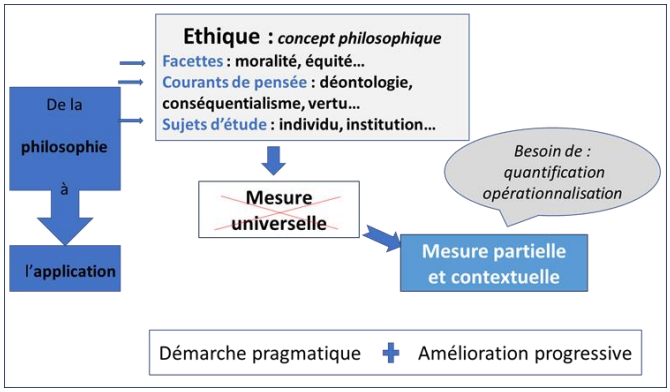


Figure 6. Les enjeux de la mesure de l'éthique

5 CONCLUSION

Cet article a eu pour objet de tirer des conclusions du deuxième débat organisé dans le cadre du projet ETHICS40 sur la prise en compte des risques éthiques dans le management de la performance dans l'Industrie 4.0. Les discussions et les réponses obtenues ont été riches, confirmant l'importance du sujet et la difficulté pour nous, chercheurs, à intégrer la dimension éthique dans le pilotage et l'amélioration continue de la performance durant l'exploitation des systèmes industriels du Futur.

Plus précisément, ce débat a confirmé les hypothèses de recherche et les verrous scientifiques posés dans le projet ETHICS40. En particulier, les besoins respectifs de positionner les concepts d'éthique et de performance et d'en caractériser la corrélation, de prendre en compte des risques éthiques dans l'amélioration de la performance et la mesure de l'éthique, dans une logique de maturité dans le domaine sont confirmés. Le débat a également été source de nouvelles pistes de réflexion qu'il s'agira de formaliser, en complément du projet en cours, pour aider les partenaires dans les travaux sur le sujet. En particulier, une vision globale des risques éthiques, respectivement à court et long termes sera adoptée. De même, une démarche pragmatique et progressive de la mesure de l'éthique et de la maturité des systèmes industriels est envisagée, restreignant les différents aspects de l'éthique dans un premier temps. Une validation des différentes perspectives est en permanence effectuée par le fabricant de roulements, équipementier automobile et aéronautique NTN Europe, partenaire industriel du projet et co-auteur de cet article.

Les auteurs espèrent que ce document suscitera d'autres discussions, d'autres débats sur ce sujet sensible mais ô combien essentiel, la vitesse avec laquelle les outils de l'IA apparaissent étant phénoménale. Les prochains débats porteront sur des sujets tels que le positionnement de l'éthique vis-à-vis de notions voisines telles que la RSE et l'économie circulaire, ses courants de pensée et leurs conditions d'application en milieu industriel, l'utilisation efficace et éthique des différentes technologies. etc. Ils s'adresseront à des publies variés, académiques et industriels, touchant à des domaines et disciplines tels que l'informatique, les ressources humaines, la philosophie, le droit du numérique.

Comme annoncé, tout au long du projet ETHICS40, il est prévu des points d'étape où les différents avancements seront proposés pour expertise auprès des différentes communautés, scientifiques et industrielles.

6 REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans cet article ont été menés dans le cadre du projet ANR ETHICS40 "Management des risques éthiques dans l'Industrie du Futur" (ANR-236CE1060014), dont les membres sont : LAMIH/UPHF, LISTIC/USMB, CERAG/UGA et le partenaire industriel NTN Europe. Les auteurs remercient l'ANR pour son soutien. Ils remercient également le CT « IMS^2 » de la SAGIP pour son aide dans l'organisation du débat étudié dans cet article.

7 REFERENCES

Agudelo, M.A.L., Jóhannsdóttir, L., Davídsdóttir, B. (2019). A literature review of the history and evolution of corporate social responsibility. *International Journal of Corporate Social Responsibility*, 4(1), 1–23

Bankar, S. Shukla, K. (2023). Performance Management and Artificial Intelligence: A Futuristic Conceptual Framework. Grima, S., Sood, K. and Özen, E. (Ed.) *Contemporary Studies of Risks in Emerging Technology*, Part B (Emerald Studies in Finance, Insurance, and Risk Management), Emerald Publishing Limited, Leeds, 341-360.

Bergmann, L.T., Schlicht, L., Meixner, C., König, P., Pipa, G., Boshammer, S., Stephan, A. (2018). Autonomous vehicles require socio-political acceptance-an empirical and philosophical perspective on the problem of moral decision making. Frontiers in behavioral neuroscience, 12(31).

Berrah, L., Trentesaux, D. (2021). Decision-Making in Future Industrial Systems: Is Ethics a New Performance Indicator?. In: Borangiu, T., Trentesaux, D., Leitão, P., Cardin, O., Lamouri, S. (eds) *Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future. SOHOMA 2020. Studies in Computational Intelligence* (Vol. 952). Springer, Cham.

Berrah L., Trentesaux D., Guerre-Chaley F. (2024). Retour sur le premier débat lié aux enjeux éthiques dans l'industrie 4.0 organisé dans le cadre du projet ANR ETHICS40, <hal-04514320>.

Berrah L., Trentesaux D., Jimenez Gordillo J.-F. (2024). Ethics in Performance Management of Future Industrial Systems: Weak and Strong Views. In: Borangiu, T., Trentesaux, D., Leitão, P., Berrah, L., Jimenez, JF. (eds) *Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future. SOHOMA 2023. Studies in Computational Intelligence*, (Vol 1136). Springer, Cham.

Berrah L., Trentesaux D., Guerre-Chaley (2025), Retour sur le deuxième débat lié à la prise en compte des risques éthiques dans le pilotage et l'amélioration continue de la performance, organisé dans le cadre du projet ANR ETHICS40, <hal-04944907>.

Bititci, U., Cocca, P., Ates, A. (2016). Impact of visual performance management systems on the performance management practices of organisations. *International Journal of Production Research*, 54(6), 1571–1593.

Büchi, G., Cugno, M., Castagnoli, R. (2020). Smart factory performance and Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 150, 119790

Cosa, M., Torelli, R. (2024). Digital Transformation and Flexible Performance Management: A Systematic Literature Review of the Evolution of Performance Measurement Systems. *Global Journal of Flexible System Management*, 25, 445–466.

Culot, G., Nassimbeni, G., Orzes, G., Sartor, M. (2020). Behind the definition of Industry 4.0: Analysis and open questions. *International Journal of Production Economics*, 226, 107617.

Ding, B., Ferràs Hernández, X., & Agell Jané, N. (2021). Combining lean and agile manufacturing competitive advantages through Industry 4.0 technologies: an integrative approach. *Production Planning & Control*, 34(5), 442–458.

Elnadi, M., Abdallah, Y.O. Industry 4.0: critical investigations and synthesis of key findings. *Management Review Quarterly*, 74, 711–744.

Gilbert, G.R., Collins, R.W., Brenner, R. (1980). Age and leadership effectiveness: From the perceptions of the follower. *Human Resource Management*, 29(2), 187–196.

Hawashin D., Nemer M., Gebreab S.A., Salah K., Raja Jayaraman R., Khurram Khan M., Ernesto Damiani E. (2024). Blockchain applications in UAV industry: Review, opportunities, and challenges. *Journal of Network and Computer Applications*, 230, 103932,

Lopes M. A., Martins R. A. (2021). Mapping the Impacts of Industry 4.0 on Performance Measurement Systems. *IEEE Latin America Transactions*, 19(11), 1912-1923.

Marbun, T., Sobandi, A., Risali, R. P. A. (2024). Performance Management System in Industry: A Systematic Literature Review. *International Journal of Science and Society*, 6(2), 350-361.

Rahanu, H., Georgiadou, E., Siakas, K., Ross, M., Berki, E. (2021). Ethical issues invoked by Industry 4.0. *European Conference on Software Process Improvement*. Springer, Cham, 589–606.

Ricoeur, P. (2015). *Soi-même comme un autre*. Média Diffusion.

SAGIP (2024). Société Automatique de Génie Industriel et de Productique.2ème Congrès annuel.

Shayganmehr, M., Kumar, A., Garza-Reyes, J.A., Moktadir, M.A. (2021). Industry 4.0 enablers for a cleaner production and circular economy within the context of business ethics: A study in a developing country. Journal of Cleaner Production, 281, 125280.

Trentesaux, D., Caillaud, E. (2020). Ethical stakes of Industry 4.0. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 17002–17007.

Trentesaux D. (2021). Ensuring ethics of cyber-physical and human systems: a guideline. In: Borangiu, T., Trentesaux, D., Leitão, P., Cardin, O., Lamouri, S. (eds) *Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future*, (Vol. 987), Springer Cham

Trentesaux D., Berrah L., Samuel K. (2024). Éthique opérationnelle dans les systèmes industriels du futur : éléments méthodologiques. *Ethique et transition numérique*, Eds. Abel, M.H., Matta N., Karray H., Saad I., 157-184, ISTE.

Varma A., Pereira V., Patel P. (2024). Artificial intelligence and performance management. Organizational Dynamics, 53(1), 101037.

Vinodh, S., Antony, J., Agrawal, R. and Douglas, J.A. (2021), Integration of continuous improvement strategies with Industry 4.0: a systematic review and agenda for further research, *The TQM Journal*, 33(2), 441-472.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Insights on Security-by-Design of Cyber-Physical Production Systems: A Systematic Mapping

AHMED ELMARKEZ [1,2,3], SORAYA MESLI-KESRAOUI[3], FLAVIO OQUENDO[1], PASCAL BERRUET[2]

[1] IRISA - Université Bretagne Sud,
Rue Yves Mainguy – BP 573, 56000, Vannes, France

[2] LAB-STICC - Université Bretagne Sud
Rue de Saint-Maudé, 56100, Lorient, France

[3] SEGULA Engineering
165 rue de la Montagne du Salut, 56602, Lanester, France
Ahmed.elmarkez@segula.fr

Résumé **– Les Systèmes de Production Cyber-Physiques (CPPS) ont évolué, passant d'entités autonomes à une interconnexion croissante avec l'Internet Industriel des Objets (IIoT) émergent. Par conséquent, l'adoption des technologies de l'information et de la communication dans le contexte des technologies opérationnelles les a rendus plus vulnérables à des menaces pour lesquelles ils n'ont pas été conçus et qu'ils ne tolèrent pas en raison de leur criticité. Ces défis soulignent l'importance de la résilience, définie comme la capacité d'un système à anticiper, absorber, se rétablir et s'adapter à des conditions défavorables, en tant que caractéristique fondamentale des CPPS. Une approche visant à renforcer la résilience en matière de sécurité repose sur la mise en œuvre des principes de *Security-by-Design*, qui consistent à intégrer des mesures de sécurité dès les premières phases du développement des systèmes. L'approche *Security-by-Design*, qui prend en compte la sécurité dès les premières étapes du cycle de vie des systèmes en intégrant des pratiques d'ingénierie sécurisée dans le processus d'ingénierie des systèmes cyber-physiques, a suscité un intérêt croissant pour répondre aux préoccupations de sécurité dans ce contexte. Ainsi, dans cet article, nous identifierons, classifierons et analyserons les recherches existantes sur la « sécurité par conception » appliqué aux CPPS, tout en extrayant les principaux enseignements des publications pertinentes parues au cours des dix dernières années. Pour atteindre cet objectif, nous avons mené une étude de cartographie systématique en suivant un protocole rigoureux conforme aux lignes directrices précises des études systématiques.**

Abstract **– Cyber-Physical Production Systems (CPPS) have evolved from being stand-alone in the past to increasingly becoming connected to the emerging Industrial Internet of Things (IIoT). Therefore, the adoption of information and communication technology in the context of operational technology has made them more vulnerable to threats they were not designed for and which they do not tolerate due to their criticality. These challenges highlight the importance of resilience, the ability of a system to anticipate, absorb, recover from, and adapt to adverse conditions, as a fundamental characteristic of CPPS. One approach to fostering sùmecurity resilience is through the implementation of Security-by-Design principles, which involve integrating security measures from the earliest stages of system development. The approach of Security-by-Design, where security is considered very early in the systems lifecycle, by integrating secure engineering practices into the engineering process for cyber-physical systems, has attracted much attention for addressing the consequent security concerns in this context. Thereby, in this paper, we will identify, classify, and analyze existing research on Security-by-Design for CPPS as well as derive their key insights from the relevant publications that appeared in the last ten years. To achieve this objective, we conducted a systematic mapping study based on a rigorous protocol according to precise systematic study guidelines.**

Mots clés **- Systèmes de Production Cyber-Physiques (CPPS), Sécurité par conception, Résilience.**
Keywords **– Cyber-Physical Production Systems, Security-by-design, Resilience.**

1 INTRODUCTION

Cyber-Physical Production Systems (CPPS) are industrial automation systems that merge physical and digital elements to execute production tasks within manufacturing environments. These systems, which evolved from standalone setups in the past to interconnected systems within the Industrial Internet of Things (IIoT) in the present, having become Cyber-Physical Systems (CPS), are susceptible to new threats due to the integration of information and communication technology into operational technology, posing challenges given their critical operational nature (Brenner, 2013). For instance, for industrial control systems, the core of CPPS, the number of vulnerabilities had increased from 19 in 2010 (Andreeva et al., 2016) to 1342 in 2022 including nearly 1000 that have a high or critical severity rating (Kovacs, 2023). Even worse, the number of forever-day vulnerabilities-flaws that will likely never get patches increased to 28\% in 2022, up from 14\% in

2021 (Kovacs, 2023). Moreover, in 2017, 64\% of vulnerability patches applied to industrial control systems did not fully eliminate the risk because the components were insecure by design (DRAGOS, 2018). These challenges underscore the necessity of incorporating **security resilience** principles during the design phase of system development. By embedding resilience at the outset, systems can be better equipped to anticipate potential disruptions, withstand adverse conditions, and recover quickly from failures. Indeed, “effective security measures don't primarily manifest themselves in the installation of a dedicated security component such as a firewall, but rather in a hodgepodge of larger and smaller decisions that may involve the basic architecture, requirements for component selection, configurations of already established components, or even requirements for operational and functional use of the components” (Fluchs et al., 2022). Therefore, security decisions should be taken very early in the engineering lifecycle of CPPS, at least since the design phase, what is referred to as the approach of **Security-by-Design** (Fluchs et al., 2022; Geismann & Bodden, 2020; Nguyen et al., 2017).

Given the aforementioned concerns, this paper presents an overview of methodologies that follow the approach of Security-by-Design by presenting the result of the systematic mapping we have conducted, addressing the following two questions:

- **RQ1**: Where are we now in terms of published Security-by-Design methodologies?
- **RQ2**: Where shall we go to when developing the next Security-by-Design methodologies?

The remainder of this paper is organized as follows. Section 2 presents background and related works. Then, section 3 describes the adopted research method for systematic mapping. In section 4, we present an overview of Security-by-Design methodologies, followed by a discussion in section 5 where main insights are elicited and expressed as requirements for the next generation of Security-by-Design methodologies. Finally, we conclude and present future work in section 6.

2 Background and Related Work

2.1 Background

In this subsection, different definitions of essential technical concepts are presented.

- Attack. "An attempt to gain unauthorized access to system services, resources, or information, or an attempt to compromise system integrity, availability, or confidentiality" (Stouffer et al., 2023).
- Threat. "Any circumstance or event with the potential to adversely impact agency operations (including mission, functions, image, or reputation), agency assets, or individuals through an information system via unauthorized access, destruction, disclosure, modification of information, and/or denial of service" (Stouffer et al., 2023).
- Weakness. "Defect or characteristic that may lead to undesirable behavior" (Ross et al., 2022).
- Vulnerability. "Weakness in an information system, system security procedures, internal controls, or implementation that could be exploited or triggered by a threat source" (Stouffer et al., 2023).
- Security properties. It mainly consists of Confidentiality, Integrity, and Availability (CIA) (Technology, 2004). Other cybersecurity concepts are considered as security properties like authentication, and non-repudiation... They are mentioned in this systematic mapping as "other security properties".
- Security aspects. "security threats, vulnerabilities, attacks, and security solutions as different aspects to be considered while engineering security" (Nguyen et al., 2017).
- Security decisions. "Setting a security requirement to address a security problem" (Fluchs, 2022).
- Security-by-Design is a security approach defined in (Fluchs et al., 2022) as the sufficiently early integration of security decisions into an established engineering workflow (or base workflow) which ensures that crucial design decisions remain open to influence.

2.2 Related Work

The study presented in (Fluchs et al., 2022) introduces several existing Security-by-Design approaches for ICS and categorizes them based on their integration into existing engineering workflows. However, a notable drawback of (Fluchs et al., 2022) is its lack of systematic study. Additionally, our study focuses on extracting trends and challenges of Security-by-Design methodologies for CPPS.

(Nguyen et al., 2015) and (Geismann & Bodden, 2020) are two systematic literature reviews providing a detailed analysis of the state of the art in model-driven security. (Nguyen et al., 2015) does not solely concentrate on CPPS (only 6\% of the studies they covered are from the CPS area). Meanwhile, (Geismann & Bodden, 2020) only considers papers that integrate security in all phases of the system engineering lifecycle, unlike us, who specifically focus at least on the design and implementation phases.

In their study, (Nguyen et al., 2017) conduct a systematic mapping of model-based security engineering approaches for CPS. They aim to analyze the prevalence, characteristics, and open issues within this domain. However, their focus remains solely on model-based engineering approaches, without considering whether the primary studies addressed other system requirements, as explored in our current study.

(Lun et al., 2016) conducted a systematic mapping study aiming at identifying, classifying, and analyzing existing research on CPS security to better understand how security is addressed when dealing with CPS. However, it considers security in CPS in general and does not specifically focus on Security-by-Design approaches.

In their survey, (Humayed et al., 2017) studied existing research on CPS from three perspectives: the CPS security perspective, the CPS components perspective, and the CPS system perspective. However, it is not a systematic study, and it focuses neither on Security-by-Design nor on other system requirements considered by the primary studies.

(Anton V. Uzunov et al., 2012) surveyed a large set of methodologies for security in distributed systems. Nevertheless, it does not focus on studying other system requirements considered by methodologies.

In their survey, (Kriaa et al., 2015) provide a comparative analysis of existing approaches to industrial facility design and

risk assessment that consider safety and security. However, their study focuses on risk assessment and only considers approaches that combine safety and security.

Huang et al. (Huang et al., 2024) conducted a systematic literature review on CPS security modeling, focusing on threat and attack modeling, whereas our study takes a broader approach by examining the full spectrum of security-by-design methodologies.

Mashkoor et al. (Mashkoor et al., 2023) performed a systematic mapping study on model-driven engineering for safety and security in software systems but limited their scope to studies addressing both aspects simultaneously.

Harkat et al. (Harkat et al., 2024) reviewed CPS security threats, vulnerabilities, attacks, and assessment mechanisms, emphasizing ethical and societal impacts. However, their study does not specifically analyze security-by-design methodologies or their integration with system requirements.

Del-Real et al. (Del-Real et al., 2024) explored security-by-design and privacy-by-design concepts in software systems, focusing on their foundational definitions rather than the procedural and operational aspects of these methodologies.

In contrast to all these studies, our research considers all types of system requirements and how they were considered, in addition to security, from a Security-by-Design perspective. Also, we consider all types of methodologies regarding mechanisms used to integrate security from a Security-by-Design perspective.

3 RESEARCH METHOD

We followed the guidelines provided in (Kitchenham & Charters, 2007) and (Petersen et al., 2015) to conduct our systematic mapping. This review generally involves the following three primary phases.

3.1 Planning

Firstly, research questions were identified based on study requirements and the limitations of previous research. Then, a detailed protocol was developed, specifying exclusion criteria and search terms to be used in the automatic search. The following exclusion criteria EC are used to exclude papers during the paper selection process.

- (EC1) Unrelated domain studies are excluded (must be about CPPS domain).
- (EC2) Studies not focusing on a "security-by-design" methodology are excluded. That means that papers that propose novel security components (a middleware for example) or a response mechanism to a cyber attack for a given type of system are not included in our study.
- (EC3) Studies not focusing on design or implementation phases are excluded. That means that papers that do not consider at least one of these phases are not included.
- (EC4) Old version and work-in-progress studies are excluded.
- (EC5) Studies before 2012 or after 2022 are excluded.
- (EC6) Papers less than 4 pages are excluded.
- (EC7) Secondary and tertiary studies are excluded.
- (EC8) Non peer-viewed papers are excluded.
- (EC9) Non-English papers are excluded.

A data extraction form was created to gather relevant data to address two research questions. Initially, we extracted documentation-related data such as the domain, venue type, and context (academic or industrial). This enabled us to determine the frequency of publications on Security-by-Design methodologies, assess the maturity of primary studies based on venue type, and gauge industry interest in Security-by-Design methodologies. On the other hand, to assess the current state-of-the-art of Security-by-Design methodologies (RQ1) and to identify open issues for developing the next Security-by-Design methodologies (RQ2), we extracted information on the covered development life-cycle phases, the security aspects and properties utilized, the system requirements considered, and the security integration mechanisms employed by Security-by-Design methodologies.
The protocol and extraction form underwent multiple reviews to ensure agreement among participants before moving to the next phase.

3.2 Conducting

In this phase, the established protocol was put into action. Initially, candidate papers on Security-by-Design were sought through automatic searches across key databases (IEEE, ACM, and ScienceDirect). Afterward, candidate papers were filtered to create a final list of primary studies addressing research questions. Snowballing was also used to identify additional papers. A total of 25 primary studies were chosen through the systematic selection process. The list of the primary studies is presented in Table 1 in Appendix A. As planned, data extraction was carried out and completed. The collected data was synthesized and analyzed using various graphics to address the research questions.

3.3 Reporting

The ultimate phase involved the compilation of results and dissemination of the study to potentially interested parties. This report provided a comprehensive overview of the principal findings. Ultimately, the report underwent rigorous review processes before publication.

4 SECURITY-BY-DESIGN METHODOLOGIES: WHERE ARE WE NOW?

This section, synthesized into two subsections, presents the results of the mapping study carried out to reply RQ1 Where are we now in terms of published Security-by-Design methodologies?

4.1 On the Publication of Security-by-Design Studies

4.1.1 In What Years Were the Studies Published?

Figure 1 shows the increasing interest in Security-by-Design methodologies. Indeed, 72\% of primary studies were published between 2018 and 2022 (the last five years).

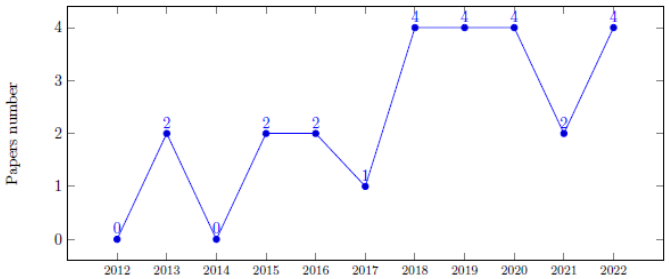


Figure 1: Distribution of papers per year

4.1.2 What Types of Publication Venues Hosted the Studies?
Figure 2 shows that a greater number of primary studies are published at conferences (15 papers) compared to journals (8 papers) or workshops (2 papers). This indicates that Security-by-Design is a new research direction where ideas are expected to be more effectively exchanged at conferences, and it has not yet reached a level of maturity to be published in journals.

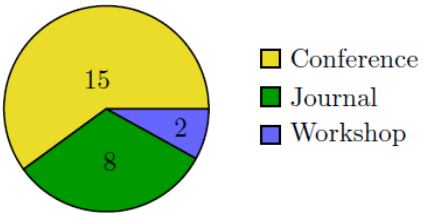


Figure 2: Distribution of papers according to their venue type

4.1.3 Which Contexts Showed Greater Interest in the Security-by-Design Paradigm?
As depicted in Figure 3, 19 papers (76\%) originate from academic contexts, with only 1 paper emerging from the industrial context, and 5 papers resulting from collaborations between the two contexts. Notably, industrial involvement has seen a rise in recent years (2019-2022), as illustrated in Figure 4. This trend is linked to the increasing of cyber crimes on CPS, which has highlighted the shortcomings of current security methodologies. It emphasizes the urgent need to integrate security early in the design phase as a monolithic and cost-effective solution for the engineering of security-critical CPS (Cong et al., 2016).

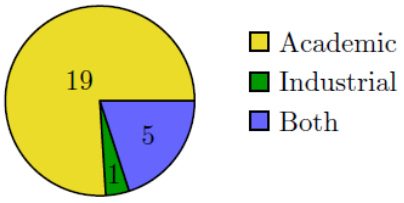


Figure 3: Distribution of papers according to their context

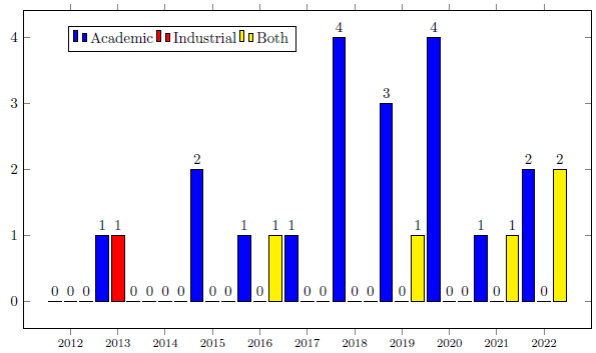


Figure 4: Distribution of papers per year over context

4.2 Characteristics of Security-by-Design Methodologies

4.2.1 What exactly are the System Development Life-cycle Phases Concerned by Security-by-Design Methodologies?
As explained before, we focused our study on only methodologies considering at least the design or implementation phases. As can be seen in Figure 5, 15 papers consider only the design phase (60\%), and only 4 papers consider all the development life-cycle phases. We can notice that all papers consider the design phase.

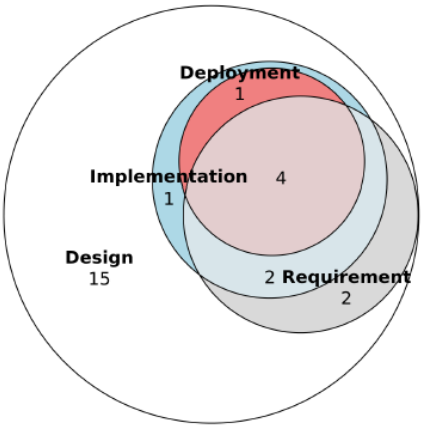


Figure 5: Distribution of papers according to development life-cycle phases

4.2.2 Which Security Aspects (e.g., Attacks, Threats, Vulnerabilities, Security Controls) were Focused on?
In Figure 6, we observe that the majority of studies concentrate on analyzing security from the Attack/Threat perspective. Specifically, 13 out of 25 papers (52\%) only concentrate on this aspect. Additionally, 6 papers adopt a dual perspective, examining both attack/threat and vulnerability/weakness perspectives in security analysis. For example, **S7** initially pinpoints system vulnerabilities and subsequently delineates attacks/threats associated with these vulnerabilities to define security requirements. Similarly, **S9** employs security threats to identify corresponding security measures during the design phase, then leverages vulnerabilities from the CVE database of cybersecurity vulnerabilities in the simulation phase to identify further attacks/threats.

Figure 6: Distribution of papers according to the considered security aspects

4.2.3 Which Security Objectives (CIA etc.) were Addressed?
19 out of 25 (76\%) consider implicitly security properties (Figure 7). In these primary studies, the authors focus on attacks/threats or vulnerabilities/weaknesses as an input to their methodology from which they should protect their systems without specifying the security objectives they intend to enforce. As shown in Figure 8, among the 6 primary studies that explicitly consider security objectives, additional security properties beyond confidentiality, integrity, and availability

were also taken into account. These include authentication, anti-tampering measures, and others.

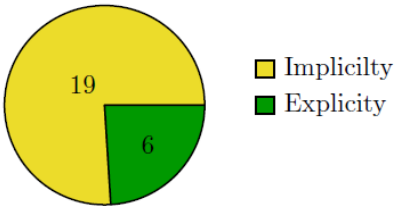


Figure 7: The way security properties were addressed in the primary studies

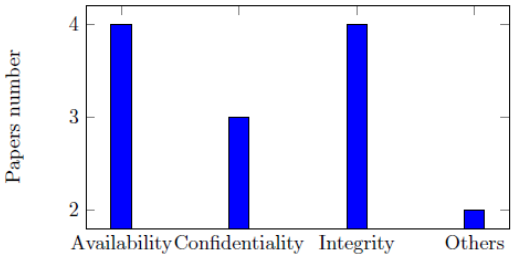


Figure 8: Security properties that had been addressed in the primary studies

4.2.4 Which other System Requirements were Considered while Integrating Security?

In Figure 9 we can see that 15 papers considered other system requirements when integrating security. 9 of them had considered safety as a specific quality requirement (for instance **S2, S3, and S7**). Other studies took performance (**S6**), resource constraints (**S5**), cost (**S20**), and functional requirements (**S23**) into account.

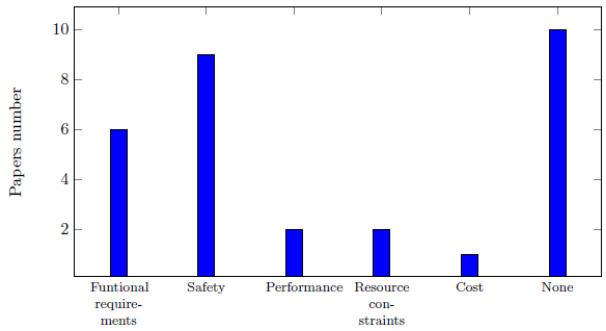


Figure 9: System requirements that were considered by the primary studies

4.2.5 Which Security Integration Mechanism is used by Security by Design Methodologies?

Security integration can be achieved through four different mechanisms (Fluchs et al., 2022):

- **Merging.** The base workflow is modified to incorporate (merge) a set of security steps from the security workflow.
- **Coupling.** The security and the base workflows are independent but communicate (coupled) via connection points. The security workflow utilizes the outcomes of the base workflow, and subsequently, the results of the security workflow are fed back into the base workflow.
- **Triggering.** In this mechanism, a single connection point to the base workflow serves as the starting (triggering) point for the security workflow. Once the security workflow is completed, it is possible, but not mandatory, for the results to be returned to the base workflow.
- **Harmonization.** In this mechanism, the security workflow is adapted to be as similar as possible to the base workflow, i.e., the two workflows are harmonized.

These mechanisms affect design decisions differently. The merging mechanism prioritizes security in all design decisions. Coupling's impact depends on the number of connection points between the two workflows. Triggering has minimal influence with one connection point. Harmonization lacks clear guidance, potentially leading to oversight in design decisions, with medium influence.

The most used mechanisms (Figure 10) are merging (12 papers) and triggering (10 papers). For example, the authors of **S6** use design space exploration to choose the system components that satisfy the security and performance requirements by merging the conception workflow and the security workflow to choose the optimal solution design. Conversely, only two studies utilized harmonization, a mechanism typically employed to manage conflicts. For instance, **S3** tried harmonizing safety and security requirements during the design of CPSs.

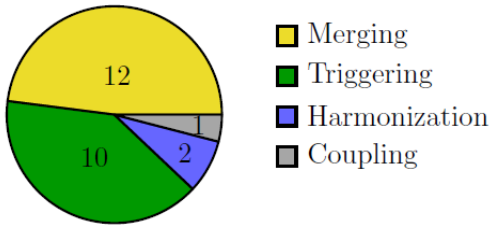


Figure 10: Security integration mechanisms distribution

5 SECURITY-BY-DESIGN METHODOLOGIES: WHERE SHALL WE GO?

Based on the findings from RQ1, which resulted in an overview of where are we now in terms of published Security-by-Design methodologies, we will present in this section the requirements to be satisfied when developing the next Security-by-Design methodologies.

5.1 Development Lifecycle Phases beyond the Design Phase are not Sufficiently Considered

All the studied papers consider the design phase. Moreover, 60\% of studies consider only the design phase (for instance **S11, S12 and S14)**. We can conclude that the design phase is the main phase where security is integrated when dealing with the Security-by-Design approach. Note, nevertheless, that during the following engineering lifecycle phases, many modifications and vulnerabilities may be introduced into the system. Indeed, a secure design does not eliminate the introduction of certain vulnerabilities such as buffer overflows and race conditions during the implementation phase (OWASP, 2021). Therefore, *the integration of security, when developing the next Security-by-Design methodologies, shall encompass not only the design phase but also the successive refinements or transformations from design to implementation and the implementation phase in itself during the engineering lifecycle*.

5.2 Vulnerabilities/flaws are not Considered enough in Security Analysis

whereas few primary studies focus on security weaknesses/vulnerabilities in their security analysis. The vast majority of primary studies focus on attacks/threats to analyze system security. Yet, an attack/threat exploits a

weakness/vulnerability to produce the system loss. More importantly, controlling system weaknesses and vulnerabilities not only prevents disruptions from known threats but also from unknown ones (Young & Leveson, 2013). Hence, *the next Security-by-Design methodologies shall integrate within its focus system weaknesses/vulnerabilities*.

5.3 Implicit Security Properties/Objectives

76\% of primary studies consider security objectives implicitly. These studies typically focus on threats/attacks as an input to their methodology from which they should protect their systems without specifying which security objectives they intend to enforce (for instance **S12 and S13)**. Alternatively, they deal with security objectives in a general way by extracting them from the system requirements that change from one system to another (Ruiz et al., 2012). Also, from the perspective of security engineering, *the next Security-by-Design methodologies shall be guided by security properties*. By clearly delineating the security objectives being addressed, the next Security-by-Design methodologies will systematically and persuasively address those concerns (Nguyen et al., 2017).

5.4 Lack of dealing with security and system requirements conflicts

Contrary to our assumptions, many primary studies have taken other system requirements into account when integrating security. For example, safety was taken into account to tackle hazards caused by security concerns (for instance **S2, S3, and S7**). On the other hand, a trade-off was made between performance and security in many studies (for instance **S6**). Especially in embedded systems, a balance was struck between resource constraints or usage and implementing security countermeasures due to the inherent limitations of these systems (for example **S5 and S20)**. Lastly, to ensure the fulfillment of functional objectives, security measures were aligned with functional requirements (for example **S23)**.

However, most of these studies overlook conflicts between security and other system requirements. Thereby, *the next Security-by-Design methodologies shall introduce more comprehensive methods that address conflicts between security and other system requirements at the design phase, ensuring early resolution*.

5.5 Lack of Independence and Influence between System Engineering and Security Engineering

The majority of studies employ either merging (for instance **S4, S7 and S14)** or triggering (for instance **S12, S15 and S17)** mechanisms to integrate security. This indicates that most methodologies are either closely linked to the domain and the base workflow they were merged into (for merging mechanisms) or that security decisions do not significantly influence design decisions (for triggering mechanisms). In fact, for the merging mechanism, the security workflow is part of the base workflow and can influence any design decision. Here the methodologies wield considerable influence over the base workflow, yet they exhibit limited independence from it (Fluchs et al., 2022). Regarding the triggering mechanism, its impact on the base workflow is minimal due to its singular connection point. Consequently, it demonstrates a notable level of independence from the base workflow (Fluchs et al., 2022).

To enhance the influence and the independence of security integration, *the next Security-by-Design methodologies shall address the limitations of existing integration mechanisms by coordinating the interaction of multiple mechanisms or by devising new integration mechanisms*.

6 CONCLUSION

This paper presents the findings of the systematic mapping study we conducted, for examining the current landscape of Security-by-Design methodologies for Cyber-Physical Production Systems. Security-by-Design focuses on embedding robust security measures during the early stages of system development, aligning with resilience principles by proactively addressing vulnerabilities and mitigating potential risks. The study provides an overview of the current advantages and drawbacks of Security-by-Design methodologies, at the current state-of-the-art. Furthermore, the study carried out was meticulously planned and executed according to a well-defined systematic mapping study protocol and data extraction form ensuring the accuracy and reliability of both the results and their analysis.

In future work, we intend to align our research efforts with the insights gleaned from this systematic mapping, aiming to address the issues raised by current Security-by-Design methodologies to ensure the resilience of CPPS in the face of evolving threats and operational challenges. Our goal is to define a novel next-generation Security-by-Design methodology, by designing and implementing a comprehensive Security-by-Design approach tailored for industrial control systems coping with the identified requirements as well as being largely automated. This methodology will not only embed security measures into the design and implementation stages of the system engineering life cycle but also consider other system requirements such as performance and safety. Crucially, it also intends to offer a methodical and clearly defined strategy for addressing conflicts that may arise between security and other system requirements.

7 REFERENCES

Andreeva, O., Gordeychik, S., Gritsai, G., Kochetova, O., Potseluevskaya, E., Sidorov, S. I., & Timorin, A. A. (2016). Industrial control systems vulnerabilities statistics. *Kaspersky Lab, Report*.

Anton V. Uzunov, Eduardo B. Fernandez, & Katrina Falkner. (2012). *Engineering Security into Distributed Systems : A Survey of Methodologies*. https://doi.org/10.3217/JUCS-018-20-2920

Brenner, J. F. (2013). Eyes wide shut : The growing threat of cyber attacks on industrial control systems. *Bulletin of the Atomic Scientists*, *69*(5), 15-20. https://doi.org/10.1177/0096340213501372

Cong, S., Jianfeng, M., & Qingsong, Y. (2016). On the Architecture and Development Life Cycle of Secure Cyber-Physical Systems. *Journal of Communications and Information Networks*, *1*(4), 1-21. Journal of Communications and Information Networks. https://doi.org/10.11959/j.issn.2096-1081.2016.041

Del-Real, C., De Busser, E., & van den Berg, B. (2024). Shielding software systems : A comparison of security by design and privacy by design based on a systematic literature review. *Computer Law & Security Review*, *52*, 105933. https://doi.org/10.1016/j.clsr.2023.105933

DRAGOS. (2018). *Industrial Control Vulnerabilities:2017 in Review*. $https://www.dragos.com/wp-content/uploads/2017-Review-Industrial-Control-Vulnerabilities.pdf$

Fluchs, S. (2022, août 29). The four paths to a security decision. *Industrial Cyber*. https://industrialcyber.co/expert/the-four-paths-to-a-security-decision/

Fluchs, S., Tasten, E., Mertens, M., Horch, A., Drath, R., & Fay, A. (2022). Security by Design Integration Mechanisms for Industrial Control Systems. *IECON 2022 – 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 1-6. https://doi.org/10.1109/IECON49645.2022.9968406

Geismann, J., & Bodden, E. (2020). A systematic literature review of model-driven security engineering for cyber–physical systems. *Journal of Systems and Software*, *169*, 110697. https://doi.org/10.1016/j.jss.2020.110697

Harkat, H., Camarinha-Matos, L. M., Goes, J., & Ahmed, H. F. T. (2024). Cyber-physical systems security : A systematic review. *Computers & Industrial Engineering*, *188*, 109891. https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.109891

Huang, S., Poskitt, C. M., & Shar, L. K. (2024). *Security Modelling for Cyber-Physical Systems : A Systematic Literature Review* (arXiv:2404.07527). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.07527

Humayed, A., Lin, J., Li, F., & Luo, B. (2017). Cyber-Physical Systems Security—A Survey. *IEEE Internet of Things Journal*, *4*(6), 1802-1831. IEEE Internet of Things Journal. https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2703172

Kovacs, E. (2023, février 10). *Siemens Drives Rise in ICS Vulnerabilities Discovered in 2022 : Report*. SecurityWeek. https://www.securityweek.com/siemens-drives-rise-in-ics-vulnerabilities-discovered-in-2022-report/

Kriaa, S., Pietre-Cambacedes, L., Bouissou, M., & Halgand, Y. (2015). A survey of approaches combining safety and security for industrial control systems. *Reliability Engineering & System Safety*, *139*, 156-178. https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.02.008

Lun, Y. Z., D'Innocenzo, A., Malavolta, I., & Benedetto, M. D. D. (2016). Cyber-Physical Systems Security : A Systematic Mapping Study. *CoRR*, *abs/1605.09641*. http://arxiv.org/abs/1605.09641

Mashkoor, A., Egyed, A., Wille, R., & Stock, S. (2023). Model-driven engineering of safety and security software systems : A systematic mapping study and future research directions. *Journal of Software: Evolution and Process*, *35*(7), e2457. https://doi.org/10.1002/smr.2457

Nguyen, P. H., Ali, S., & Yue, T. (2017). Model-based security engineering for cyber-physical systems : A systematic mapping study. *Information and Software Technology*, *83*, 116-135. https://doi.org/10.1016/j.infsof.2016.11.004

Nguyen, P. H., Kramer, M., Klein, J., & Traon, Y. L. (2015). An extensive systematic review on the Model-Driven Development of secure systems. *Information and Software Technology*, *68*, 62-81. https://doi.org/10.1016/j.infsof.2015.08.006

OWASP. (2021). *A04 : Insecure Design*. $https://owasp.org/Top10/A04_2021-Insecure_Design/$

Petersen, K., Vakkalanka, S., & Kuzniarz, L. (2015). Guidelines for conducting systematic mapping studies in software engineering : An update. *Information and Software Technology*, *64*, 1-18. https://doi.org/10.1016/j.infsof.2015.03.007

Ross, R., Winstead, M., & McEvilley, M. (2022). *Engineering trustworthy secure systems* (NIST SP 800-160v1r1; p. NIST SP 800-160v1r1). National Institute of Standards and Technology (U.S.). https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-160v1r1

Ruiz, J. F., Harjani, R., Mana, A., Desnitsky, V., Kotenko, I., & Chechulin, A. (2012). A Methodology for the Analysis and Modeling of Security Threats and Attacks for Systems of Embedded Components. *2012 20th Euromicro International Conference on Parallel, Distributed and Network-based Processing*, 261-268. https://doi.org/10.1109/PDP.2012.36

Stouffer, K., Pease, M., Tang, C., Zimmerman, T., Pillitteri, V., Lightman, S., Hahn, A., Saravia, S., Sherule, A., & Thompson, M. (2023). *Guide to Operational Technology (OT) Security* (NIST Special Publication (SP) 800-82 Rev. 3). National Institute of Standards and Technology. https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-82r3

Technology, N. I. of S. and. (2004). *Standards for Security Categorization of Federal Information and Information Systems* (Federal Information Processing Standard (FIPS) 199). U.S. Department of Commerce. https://doi.org/10.6028/NIST.FIPS.199

Young, W., & Leveson, N. (2013). Systems thinking for safety and security. *Proceedings of the 29th Annual Computer Security Applications Conference*, 1-8. https://doi.org/10.1145/2523649.2530277

8 APPENDIX A. PRIMARY STUDIES

S1 William Young and Nancy Leveson, "Systems thinking for safety and security", 29th Annual Computer Security Applications Conference (ACSAC '13). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–8, doi: 10.1145/2523649.2530277

S2 R. Oates, D. Foulkes, G. Herries and D. Banham, "Practical extensions of safety critical engineering processes for securing industrial control systems," 8th IET International System Safety Conference incorporating the Cyber Security Conference 2013, Cardiff, 2013, pp. 1-6, doi: 10.1049/cp.2013.1704.

S3 C. Schmittner, Z. Ma and E. Schoitsch, "Combined safety and security development lifecylce," 2015 IEEE 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Cambridge, UK, 2015, pp. 1408-1415, doi: 10.1109/INDIN.2015.7281940.

S4 Sabaliauskaite, Giedre and Aditya P. Mathur. "Aligning Cyber-Physical System Safety and Security." CSDM Asia (2014), doi: $10.1007/978-3-319-12544-2_4$

S5 S. Cong, M. Jianfeng and Y. Qingsong, "On the Architecture and Development Life Cycle of Secure Cyber-Physical Systems," in Journal of Communications and Information Networks, vol. 1, no. 4, pp. 1-21, Dec. 2016, doi: 10.11959/j.issn.2096-1081.2016.041.

S6 A. Motii, B. Hamid, A. Lanusse and J. -M. Bruel, "Guiding the Selection of Security Patterns for Real-Time Systems," 2016 21st International Conference on Engineering of Complex Computer Systems (ICECCS), Dubai, United Arab Emirates, 2016, pp. 155-164, doi: 10.1109/ICECCS.2016.027.

S7 Gabriel, Angelito, Juan Shi, and Cagil Ozansoy. "A proposed alignment of the National Institute of Standards and Technology Framework with the funnel risk graph

method." IEEE Access 5 (2017): 12103-12113.

S8 Mouratidis, Haralambos, and Vasiliki Diamantopoulou. "A security analysis method for industrial Internet of Things." IEEE Transactions on Industrial Informatics 14.9 (2018): 4093-4100.

S9 Geismann, Johannes, Christopher Gerking, and Eric Bodden. "Towards ensuring security by design in cyber-physical systems engineering processes." Proceedings of the 2018 international conference on software and system process. 2018.

S10 Bakirtzis, Georgios, et al. "A model-based approach to security analysis for cyber-physical systems." 2018 Annual IEEE International Systems Conference (SysCon). IEEE, 2018.

S11 Lisova, Elena, et al. "A systematic way to incorporate security in safety analysis." 2018 48th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks Workshops (DSN-W). IEEE, 2018.

S12 Mili, Saoussen, Nga Nguyen, and Rachid Chelouah. "Transformation-based approach to security verification for cyber-physical systems." IEEE Systems Journal 13.4 (2019): 3989-4000.

S13 Eckhart, Matthias, et al. "Security development lifecycle for cyber-physical production systems." IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Vol. 1. IEEE, 2019.

S14 Tantawy, Ashraf, Sherif Abdelwahed, and Qian Chen. "Continuous stirred tank reactors: Modeling and simulation for CPS security assessment." 2019 11th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN). IEEE, 2019.

S15 Tanveer, Awais, Roopak Sinha, and Matthew MY Kuo. "Secure links: secure-by-design communications in IEC 61499 industrial control applications." IEEE Transactions on Industrial Informatics 17.6 (2020): 3992-4002.

S16 Kern, Matthias, et al. "An architecture-based modeling approach using data flows for zone concepts in industry 4.0." 2020 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE). IEEE, 2020.

S17 Aigner, Andreas, and Abdelmajid Khelil. "A Semantic Model-based Security Engineering Framework for Cyber-Physical Systems." 2020 IEEE 19th International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications (TrustCom). IEEE, 2020.

S18 Levshun, Dmitry, et al. "Design and verification of a mobile robot based on the integrated model of cyber-Physical systems." Simulation modelling practice and theory 105 (2020): 102151.

S19 Tripathi, Dipty, et al. "Model based security verification of Cyber-Physical System based on Petrinet: A case study of Nuclear power plant." Annals of Nuclear Energy 159 (2021): 108306.

S20 Suri, Kunal, Gabriel Pedroza, and Patrick Leserf. "Model-Based Approach for Co-optimization of Safety and Security Objectives in Design of Critical Architectures." Model and Data Engineering: 10th International Conference, MEDI 2021, Tallinn, Estonia, June 21–23, 2021, Proceedings 10. Springer International Publishing, 2021.

S21 Quamara, Megha, Gabriel Pedroza, and Brahim Hamid. "Formal analysis approach for multi-layered system safety and security co-engineering." European Dependable Computing Conference. Cham: Springer International Publishing, 2022.

S22 Larsen, Martin H., Gerrit Muller, and Satyanarayana Kokkula. "A Conceptual Model-Based Systems Engineering Method for Creating Secure Cyber-Physical Systems." INCOSE International Symposium. Vol. 32. 2022.

S23 Promyslov, Vitaly G., Kirill V. Semenkov, and Georgy V. Promyslov. "Practical Method of the I\&C System Security Architecture Design Using Graph Models." IFAC-PapersOnLine 55.9 (2022): 227-232.

S24 Casola, Valentina, et al. "Designing Secure and Resilient Cyber-Physical Systems: A Model-based Moving Target Defense Approach." IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing (2022).

S25 Sion, Laurens, et al. "Towards automated security design flaw detection." 2019 34th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering Workshop (ASEW). IEEE, 2019.

	System requirement					Security aspect			Development life-cycle phase				Security integration mechanism			
ID	Safety	Performance	Cost	Functional requirements	Resource constraints	Attacks/threats	Vulnerabilities/Weaknesses	Security controls	Requirement	Design	Implementation	Deployment	Merging	Coupling	Triggering	Harmonization
S1	X			X			X			X					X	
S2	X					X				X					X	
S3	X					X			X	X	X	X				X
S4	X					X			X	X	X	X	X			
S5				X	X	X	X		X	X	X	X		X		
S6		X				X				X			X			
S7	X					X				X	X	X	X			
S8				X		X	X			X					X	
S9						X			X	X	X		X			
S10						X	X			X					X	
S11	X					X				X			X			
S12						X				X					X	
S13						X		X	X	X	X	X	X			
S14	X					X				X					X	
S15						X			X	X	X				X	
s16						X				X			X			
S17						X				X					X	
S18		X		X		X	X		X	X			X			
S19				X		X	X			X			X			
S20	X		X					X		X						X
S21	X			X				X		X			X			
S22						X	X		X	X			X			
S23						X		X		X			X			
S24					X	X				X	X				X	
S25							X			X					X	

9 APPENDIX B. PRIMARY STUDIES CLASSIFICATION

Table 1: Primary studies classification

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Transformative resilience of production systems: some examples

VIRGINIE GOEPP[1], EMMANUEL CAILLAUD[2], LAMIA BERRAH[3]

[1] INSA Strasbourg ICube
24, bld de la Victoire 67084 – Strasbourg Cedex, France
virginie.goepp@insa-strasbourg.fr

[2] CNAM LIRSA
2, rue Conté 75003 - Paris Cedex, France
emmanuel.caillaud@lecnam.net

[3] Polytech Annecy-Chambéry LISTIC
BP 80439, 74944 - Annecy le Vieux Cedex, France
lamia.berrah@univ-smb.fr

Résumé **– Cet article aborde le concept de résilience, en distinguant la "résilience classique" de la "résilience transformative". La résilience est définie comme la capacité d'un système à retrouver un état stable après une perturbation. Dans la perspective classique, la résilience se compose de trois phases : la préparation avant la perturbation, la réponse pendant celle-ci, et la récupération après. Cette approche se concentre sur le retour à un état de performance antérieur.**

En revanche, la résilience transformative propose un changement de paradigme. Plutôt que de simplement revenir à un niveau de performance précédent, elle vise à adapter et à transformer le système pour qu'il soit aligné avec son environnement, tout en « optimisant » les performances. Cela implique de redéfinir les objectifs de performance à chaque seuil franchi, en cherchant à évoluer plutôt qu'à revenir à un état antérieur.

La transformation requiert une modification profonde des systèmes de production, en tenant compte de divers éléments tels que les personnes, les processus, la technologie et l'information. Ces transformations doivent être gérées de manière systémique ; pour chaque élément ayant son propre processus de transformation interconnecté avec les autres. Enfin, le texte propose des exemples illustratifs des transformations nécessaires dans les systèmes de production et les chaînes d'approvisionnement, en se concentrant sur les ressources humaines, les processus, la technologie et les systèmes d'information.

Abstract **– This article discusses the concept of resilience, distinguishing between "classical resilience" and "transformative resilience". Resilience is defined as the ability of a system to return to a stable state after a disturbance. In the classical perspective, resilience consists of three phases: preparation before the disturbance, response during the disturbance, and recovery afterwards. This approach focuses on the return to a previous state of performance.**

In contrast, transformative resilience proposes a paradigm shift. Rather than simply returning to a previous level of performance, it aims to adapt and transform the system so that it is aligned with its environment, while "optimizing" performance. This involves redefining performance objectives at each threshold crossed, seeking to evolve rather than revert to a previous state.

Transformation requires far-reaching changes to production systems, taking into account elements such as people, processes, technology and information. These transformations must be managed in a systemic way, with each element having its own interconnected transformation process. Finally, the text offers illustrative examples of the transformations required in production systems and supply chains, focusing on human resources, processes, technology and information systems.

Mots clés **- Système de production ; résilience ; transformation**
Keywords **– Production system ; resilience ; transformation.**

1 INTRODUCTION

How to face important events such as COVID-19 or the war in Europe? In this paper, consider the domain of production systems and we propose an approach to transform the production system in a transformative resilience way when recovering the initial situation is not enough.

In the first section, we propose a state of the art of resilience of systems and we propose a transformative resilience framework. In section 3, we propose examples of situations leading to transformations of the production system. In section 4, we propose illustrations of transformations of the production system considering the people, the technology, the processes and the information system. In section 5, we propose a firts approach of how the transformation can be lead as a change management process. We finally conclude and propose a research agenda.

2 TRANSFORMATIVE RESILIENCE

2.1"Classical" resilience

Resilience is a matter of subject in numerous areas such as ecological systems, enterprise architecture, supply chains, etc. Based on a deep literature review of the definitions of the concept of resilience in different fields (Bhamra, Dani, & Burnard, 2011) define resilience as "the capability and ability of an element to return to a stable state after a disruption". A disruption is seen as an unexpected event having high impacts on the considered element's operation and performance. By element (Bhamra et al., 2011) consider a wide range of systems spanning from products to enterprise, to ecological systems and socio-economic systems. We rely on (Bhamra et al., 2011) definition of resilience as it is based on an extensive literature review and applies to many fields, including the production systems we are interested in.

A classical way for handling resilience is to integrate it throughout the temporal evolution of the performance level of the considered system, namely before, during and after disruption. Therefore, three key moments T1, T2 and T3 as well as corresponding phases can be described (see **Figure 1**):

- T1 corresponds to the occurrence of the disruptive event. Before T1 the system is in the so-called readiness phase of resilience. At T1 the response phase of resilience starts.
- T2 corresponds to the end of the response phase and the start of the recovery phase that is to say the end of the performance level of the system decrease period.
- T3 corresponds to the end of the recovery phase and the return of the system to a new normal (steady phase).

The figure under shows that the new state after disruption can perform the same way, better or even worse. The following conclusions can thus be drawing.

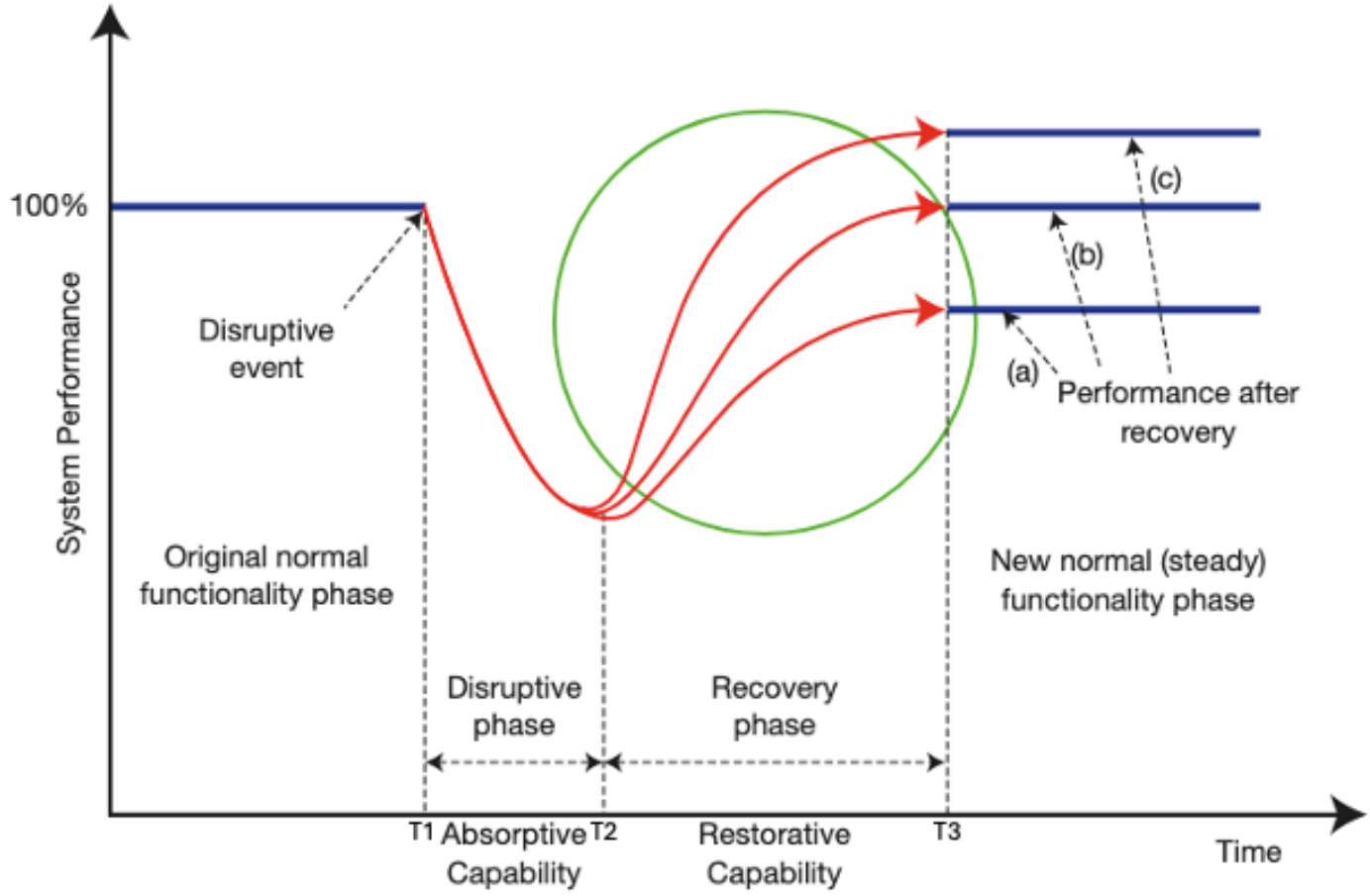


Figure 1 Key moments and phases of resilience over time adapted from figure 4.8, Chapter 4.C in (Annaswamy, Johansson, & Pappas, 2023)

First, the performance level of the system, respectively before, during and after disruption is expressed in the same way.
Second, the new steady state is generally the same equilibrium point of the system implying resilience and stability as defined in (Holling, 1973): *"Resilience determines the persistence of relationships within a system and is a measure of the ability of these systems to absorb changes of state variables, driving variables, and parameters, and still persist." whereas "Stability, on the other hand, is the ability of a system to return to an equilibrium state after a temporary disturbance. The more rapidly it returns, and with the least fluctuation, the more stable it is."*. On this basis considering a steady state of the world and not questioning the strategy, many works have been conducted in the field of logistics such as (Liu et al. 2024) or (Ivanov, 2025).

2.2 "Transformative" resilience

The idea behind the "transformative" resilience notion is to go beyond the classical view of resilience as a recovery approach after a crisis. The objective is not to be as efficient or more efficient as in the past, by recovering the reached technical performance level, but to provide a production system in harmony with the environment, while keeping in mind optimised performance. Thus, a change of paradigm is necessary. Such a transformative approach of resilience is considered in (Folke, Carpenter, Walker, Scheffer, & Rockström, 2010). The authors consider different aspects of the resilience of socio-ecological systems. If adaptability is regarded as a part of resilience within critical thresholds, transformability is defined as "the capacity to cross thresholds into new development trajectories". Each time a threshold is crossed, transformations are required as represented in **Figure 2**.

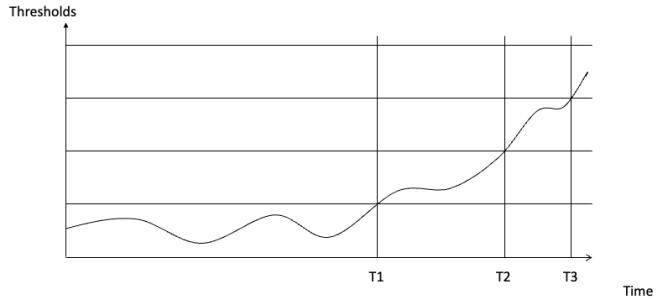


Figure 2 Transformations required due to thresholds

This requires first to challenge the steady performance evaluation feature assuming that the performance level is supposed to come back to "an assumed optimal state after disturbance" as represented in Fig. 2. This means that when there is a crisis, the objective is to come back to the centre of the target (as represented in **Figure 3**).

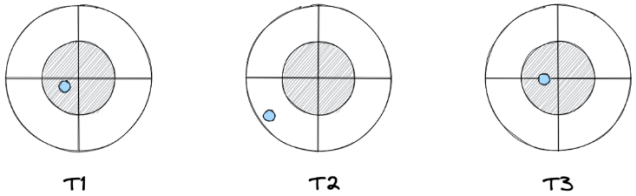


Figure 3 Representation of performance target respectively for time T1, T2 and T3

In certain conditions, it is thus possible to improve the performance after recovery (Annaswamy et al., 2023). We consider that the performance has to be evaluated differently.
For each threshold crossed, new objectives must be defined. In this case, the objective is not to come back to the centre of the target, but to define new targets and the way to improve the performance in this new space. In other words, the way performance is evaluated cannot be not steady anymore but has to evolve.
Considering the definition of transformability in (Folke et al., 2010), as the *"capacity to transform the stability landscape itself in order to become a different kind of system, to create a fundamentally new system when ecological, economic, or social structures make the existing system untenable."*, not only the performance evaluation must change, but the system itself also. The objective is not only to be resilient to a specific threat but to be able to transform the system in front of any threat: "classical" resilience becomes thus "transformative" resilience. By nature, this transformation is multiscale and has to be handled in a systemic way, different trajectories being possible according to the specific conditions of the "milieu".
As a consequence, the steady equilibrium point feature is not valid anymore. We recall it in the light of the proposition made in (Fiksel, 2003) and consider that "transformative" resilience requires production systems to have multiple equilibrium points and leads to deep transformation of them.

2.3 A framework for "transformative" resilience

Switching from "classical" to "transformative" resilience depends first on the features of the disruptions: their effects on the system and their likelihood of occurring. Second, it is strongly related to the way performance of the system is evaluated as well as the effort required to move to a new equilibrium point.
Whether this new equilibrium point is, it requires deep transformation within the production system. To go a step further in the definition of the elements concerned by this transformation we propose to rely on the resilience model presented in (Morisse & Prigge, 2017) assuming that presents the elements gathered in this model can be reused as the elements to be modified when switching to "transformative" resilience. These elements are the following:

- People;
- Processes and organization;
- Technologies;
- Information.

Moreover, when the transformation is deep strategy has also to be included as well as culture and value especially when the transformation is made in light of "strong" sustainability.
As a result, "transformative" resilience implies the interactions between the different involved elements' (see **Figure 4**). The strategy impacts every element and is also impacted by each element (emerging strategy). However, the complexity of the transformation has to be managed in order to avoid a chaotic situation despite the strong changes in the environment. Each of element has its own transformation process that is interconnected to the other transformation processes. For example, the transformations of the "People" element is of course linked with the transformations of the company "culture and values".
Last but not least, the way these multiple transformations have to be managed to switch from the old to the new equilibrium point is also an open question.

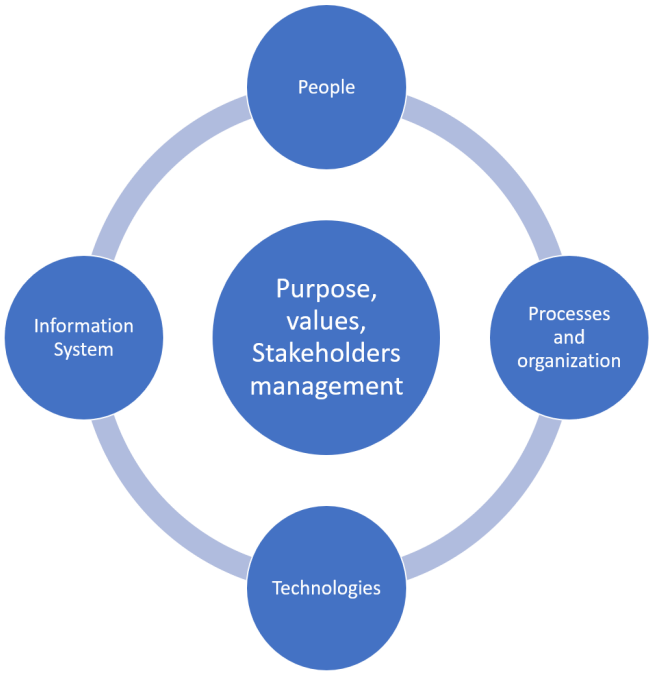


Figure 4 Interactions between the transformations

3 Required transformations?

Different types of events can lead to a transformation. Following the framework presented in section 2, we propose a list of illustrative examples impacting people, processes and organizations, technologies, information systems and the key strategy (purpose, values and stakeholder management).

The first illustration affecting people is the demography. For example, in higher education in France, we are facing a decreasing number of students after several years of regular increase. New private schools were created using the funds allocated for professional diplomas. What will be the consequences? If you manage a private university, will you decrease the number of students by class? Will you decrease the number of diplomas? Will you decrease the number of campuses? The same question arises for industry. With fewer students, the number of young specialized workers will decrease in a period where the needs can drastically increase in some areas such as nuclear power plants or green mobility.

Processes and organizations are directly impacted by a new geopolitical map. Can we at the same time consider China as a "systematic rival" for Europe and develop our importations from this country? Considering the view of the USA on the World Trade Organization from 2025, quick decisions on tariffs can be decided unilaterally. Can we still consider the USA as a commercial partner? Is the Russian market an option after the invasion of Ukraine? Each company makes his own choice: not changing anything, modifying slightly the policy or changing drastically his market and suppliers.

The impacts are linked especially to the company strategy. Transformative decisions are taken at the strategic level.

To make this kind of decision, criteria on the impacts of the events have to be defined. This approach is close to risk management. As the occurrence is difficult to define for this kind of event, we focus on the gravity of the impacts.

The objective is first to guarantee the perennity of the organisation. For an enterprise, the second one is to pay attention to its profitability now and in the long term. If we focus on the shareholders, short term consequences can be considered in priority. Family owned companies generally have strong interest in long term consequences.

A set of criteria considering short term and long term impacts of the events have to be defined. This point will be discussed later.

4 Which transformations?

In this paper, we focus on production systems and supply chains transformations. We consider that the choice of the suppliers and of the markets are out of the scope of this paper because they consider a strategic management approach out of the scope of this conference.

In this article, we focus on the human resources, process, technology and information system dimensions for 3 objects: the product, the process and the supply chain. We therefore consider 12 possible transformations of the production system.

In Table 1, we propose a list of illustrative examples of transformations.

For column one, a key transformation is the evolution of the skills and competencies of the people. For example, the designers have to develop new skills according to a new CAD tool. The introduction of a scrum approach as the process of developing the new products is also an important transformation. The introduction of 3D printing is a huge transformation for the technological dimension of manufacturing. A new approach of manufacturing using Internet of objects is very challenging for the information system.

Table 1. Considered transformations (examples)

	People	Process	Techno.	IS
Product	Designers	Scrum	Low Tech	Smart
Manuf.	Workers	Lines	3D print.	IoT
S Chain	Managers	Phy. Int	Contain.	SCM

These transformations have to be decided at the strategic level but we still have to explain the process which leads from events to transformation and how to conduct these transformations.

5 From events to transformations

What makes an event or a series of events ask for a radical transformation of the production system? How to conduct this change?

The first point is the analysis of the importance of the possible impacts of the events. For example, at the beginning of the COVID-19 crisis, is this new pathology transmissible from human to human , is it very contagious, is it very mortal? Then, is it possible to limit its impact on a specific place? Is it possible to stop the effect in a limited time? For COVID-19, the contagiosity and the mortality were high. It was not possible to limit the impacts to Wuhan and the pandemic impacted the whole world for more than 2 years. As presented in (Caillaud, 2020), the knowledge was progressive but at a certain stage, one had to make the decision to switch from crisis management to change management.

As presented by H.A. Simon in the seventies, the decisions have to be made with little information and cannot be optimal. Following the same track, we consider that the decisions not only to recover the initial situation but to switch to a transformative resilience have to be made as soon as possible to take a competitive advantage but also to guarantee the perennity of the enterprise.

6 Conclusions

In this paper, we proposed a framework for transformative resilience of production systems. Some examples of when transformations could be required, which transformations have to be considered and how the transformation can be carried out have been proposed.

The global process proposed is represented in Figure 5.

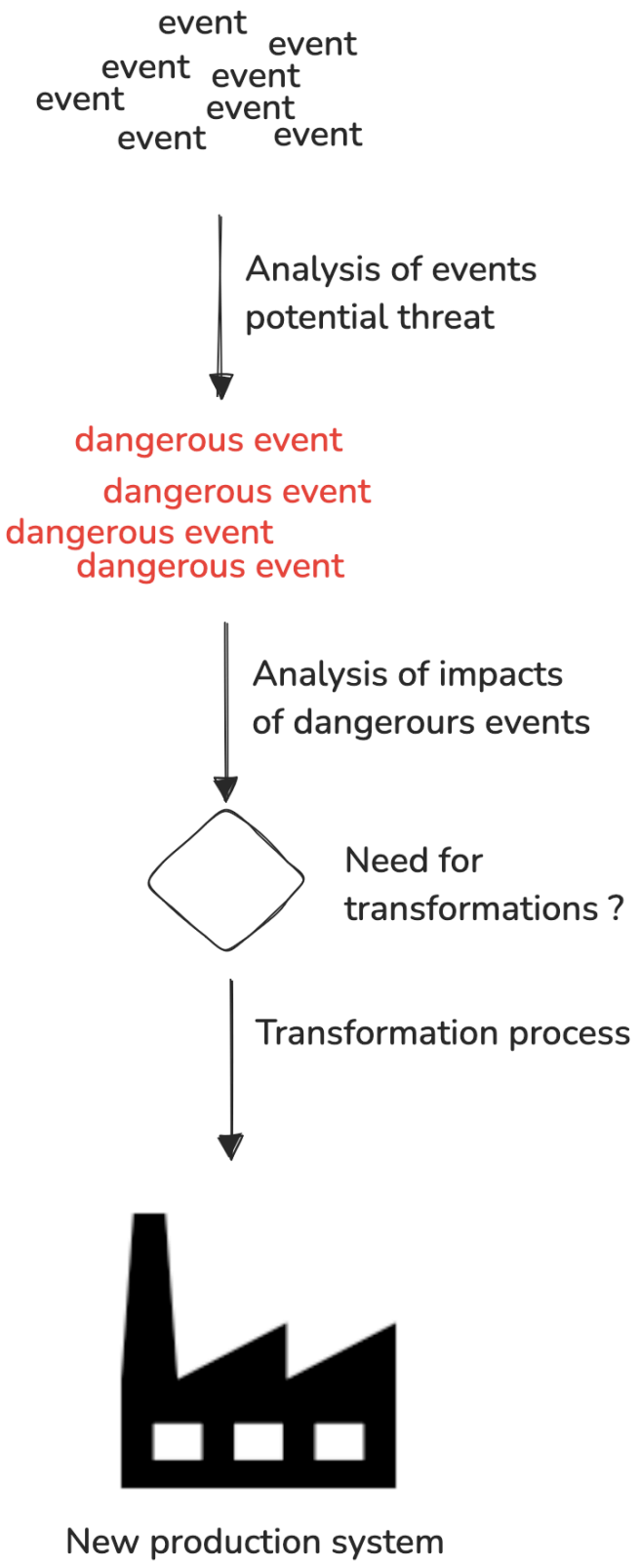


Figure 5 Proposed process for transformative resilience

Future work will focus on:

- Defining a set of criteria for deciding when to have a transformative requirement approach ;
- Defining a process for change management adapted to transformative resilience;
- defining a performance evaluation system adapted to resilient production systems. This system must non only consider evaluation resilient systems for their ability to recover their initial situation, but also their ability for transformation (modularity, strategic alignment orientation, value approach, …)

7 Acknowledgments

The authors want to thank the different colleagues and PhD students for their feed-backs these last years on resilient systems, but also industrialists sharing data, examples and views on this important subject.

8 References

Annaswamy, A. M., Johansson, K. H., & Pappas, G. J. (2023). *Control for Societal-scale Challenges: Road Map 2030*. Retrieved from https://ieeecss.org/control-societal-scale-challenges-roadmap-2030

Bhamra, R., Dani, S., & Burnard, K. (2011). Resilience: the concept, a literature review and future directions. *International Journal of Production Research, 49*(18), 5375-5393. doi:10.1080/00207543.2011.563826

Caillaud, E.. De la gestion de la crise du COVID à la transition durable : quelles leçons pour les managers ?. L'impact de la crise sur le management, EMS Editions, 2020, Business Science Institute, 978-2-37687-401-0.

Fiksel, J. (2003). Designing resilient, sustainable systems. *Environmental science & technology, 37*(23), 5330-5339. doi:10.1021/es0344819

Folke, C., Carpenter, S., Walker, B., Scheffer, M., & Rockström, J. (2010). Resilience Thinking: Integrating Resilience, Adaptability and Transformability. Ecology and Society 15(4). *Article, 15*.

Holling, C. S. (1973). Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics, 4*(1), 1-23. doi:10.1146/annurev.es.04.110173.000245

Ivanov, Dmitry. (2025). "When Is the Supply Chain Resilient? Customer and Operational Perspectives." International Journal of Production Research 0 (0): 1–16. https://doi.org/10.1080/00207543.2025.2454331.

Liu, Ming, Yueyu Ding, Feng Chu, Alexandre Dolgui, and Feifeng Zheng. (2024). "Robust Actions for Improving Supply Chain Resilience and Viability." *Omega* 123 (February):102972. https://doi.org/10.1016/j.omega.2023.102972.

Morisse, M., & Prigge, C. (2017, 2017). *Design of a Business Resilience Model for Industry 4.0 Manufacturers.* Paper presented at the 23rd Americas Conference on Information Systems (AMCIS), Boston, MA.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Simulation-Based Optimization Tool for Additive Manufacturing Systems Managed with DDMRP

MARIEM BEN KHALIFA[1], AMEL JAOUA[2], MAHA BENALI[3]

[1] DEPT. OF INDUSTRIAL ENGINEERING,
NATIONAL ENGINEERING SCHOOL OF TUNIS, UNIVERSITY OF TUNIS EL MANAR,
TUNIS, TUNISIA
mariem.benkhalifa@etudiant-enit.utm.tn
[2] DEPT. OF INDUSTRIAL ENGINEERING, LR-OASIS
NATIONAL ENGINEERING SCHOOL OF TUNIS, UNIVERSITY OF TUNIS EL MANAR,
TUNIS, TUNISIA
amel.jaoua@enit.utm.tn
[3] DEPARTMENT OF MATHEMATICS AND INDUSTRIAL ENGINEERING, POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
MONTRÉAL, CANADA
maha.benali@polymtl.ca

Abstract:
Additive manufacturing (AM), also known as 3D printing, has gained significant popularity in recent years due to its advantages, including design flexibility, reduced material waste, and the ability to produce complex geometries. However, this technology introduces complexity as it shifts the production planning paradigm from traditional mass production to on-demand manufacturing. This paper investigates the ability of the Demand Driven Material Requirements Planning (DDMRP) to effectively manage the complexity introduced by AM. To this end, a simulation-based optimization decision support tool is developed to help managers identify optimal configurations that maintain high service levels while minimizing costs within a DDMRP production system using AM. The simulation model developed with Simio represents a realistic use case involving the production of a robotic arm by AM and includes key components such as supply stations, printing stations, assembly lines, painting stations, and warehouse storage. The developed tool allows to determine the optimal lead times and the number of 3D printers needed under different demand scenarios, providing flexibility beyond what static models can provide. It also enables analysis of the impact of demand variability and the order arrival rate on the optimal configurations requested to maintain the target service level.

Additive Manufacturing, DDMRP, Production Management, Decision making, Simulation-Optimization.

1 INTRODUCTION

Additive Manufacturing (AM) represents a significant advancement in modern manufacturing systems, revolutionizing the way products are designed and manufactured. By building objects layer by layer, AM offers high design flexibility, enabling the production of complex geometries that are difficult to achieve with traditional manufacturing methods. As a result, AM is increasingly being adopted across industries, driving innovation and enabling greater customization. This evolution in manufacturing processes is a key component of Industry 4.0, where the integration of advanced technologies increases efficiency, connectivity, and production adaptability, [Haleem and Javaid, 2019]. While AM offers significant benefits in terms of customization and flexibility, it also introduces new challenges in terms of production management and resource planning. As pointed out in Cadiou et al. [2022], AM introduces complexity because it shifts the production planning paradigm from traditional mass production to on-demand, customized manufacturing. In this new model, parts are produced according to real-time demand rather than in large, pre-scheduled batches, requiring more dynamic and flexible production methods. The variability of demand and the need to optimize costs in such a complex manufacturing environment make it essential to adopt advanced solutions to improve efficiency [Mecheter et al., 2022].

To address the challenges of volatility, uncertainty, complexity, and ambiguity in manufacturing environments (often referred to as a VUCA environment), Ptak and Smith [2016] have proposed an innovative method, called Demand Driven Material Requirements Planning (DDMRP). By positioning strategic inventory buffers and dynamically adjusting inventory levels, DDMRP focuses on improving the material flows and managing production based on actual demand rather than traditional forecasting methods [El Marzougui et al., 2020]. The literature on DDMRP has demonstrated its effectiveness in improving the performance of manufacturing systems in terms of inventory control, lead time, customer service, and overall operational efficiency. Various case studies, particularly in manufacturing [Duhem et al. 2023, Dessevre et Benali. 2024] and distribution [Haji Mohammad et al. 2022], have shown that DDMRP provides better responsiveness to real-time demand signals and allows companies to be more adaptive to market changes compared to

traditional Material Requirements Planning (MRP) systems. While DDMRP is primarily associated with assembly manufacturing systems, it is not clear how it could be adapted to the more flexible and dynamic nature of an AM system.

This paper is motivated by the need of AM systems to increase service levels by reducing delays, which is perfectly in line with the logic of DDMRP. The paper aims to investigate the ability of the DDMRP to effectively manage the complexity introduced by AM. We propose to develop a simulation-based optimization decision support tool designed to optimize a production system managed by the DDMRP and using 3D printing. Considering a realistic use case involving the production of a robotic arm using AM, we developed a simulation model using the Simio software, representing the key components of the production process managed by DDMRP (supply stations, 3D printing stations, assembly lines, painting stations, and warehouse storage). Once validated, the model is integrated with OptQuest, to solve the problem based on the iterative simulation-based optimization approach. The addressed optimization problem consists in determining the optimal/suboptimal combination of two key decision variables: the number of 3D printers to activate, which determines the deployed production capacity, and the targeted production lead time, which corresponds to the delivery timeframe to commit to customers. The objective function is defined to configure the system in a way that minimizes total operational costs—including machine operation, buffer inventory, and delay-related penalties—while maximizing the service level, measured as the proportion of orders fulfilled within the targeted lead time.

This article is organized as follows: Section 2 presents a literature review. Section 3 describes the development of the simulation model. Section 4 discusses the validation of this model. Section 5 presents the conducted experiments and results. Finally, Section 6 concludes the work by highlighting the benefits of adopting DDMRP in the AM context.

2 RELATED LITERATURE

2.1 DDMRP methodology

DDMRP is a methodology proposed by Ptak and Smith [2016] to improve the efficiency of supply chain and production systems by focusing on actual customer demand rather than forecasts. It utilizes strategic inventory buffers to decouple the supply chain and protect against demand variability, ensuring that materials and resources are available when needed. DDMRP integrates real-time demand to drive production scheduling and inventory management decisions, providing a more responsive and agile approach than traditional MRP systems. By optimizing material flows and reducing waste, DDMRP helps improve lead times, reduce costs, and increase production flexibility.

In the DDMRP methodology, tricolor buffer zones (Red, Yellow, and Green zones) are used to effectively manage inventory. Figure 1 presents the different equations that enables to calculate each zone of a DDMRP buffer, where the Average Daily Usage (ADU) represents the average daily consummation of an item and is the basis for calculating buffer size; the Decoupled Lead Time (DLT) indicates the longest cumulative lead time between the buffer and upstream supply chain points; the Lead Time Factor (LTF) reflects the level of lead time variability and is expressed as a percentage (0% to 100%); the Variability Factor (VF) reflects the level of demand and supply variability and is expressed as a percentage (0% to 100%); and Minimum Order Quantity (MOQ) is the minimum quantity that can be purchased in a single order.

The Net Flow Position (NFP), calculated as the sum of the *Quantity On Hand*, the *Quantity On Order*, minus the qualified demand, provides a real-time snapshot of inventory status in relation to these buffer zones. When the NFP drops below the Top of Yellow (TOY), a production order is released to restore stock levels to the Top of Green (TOG).

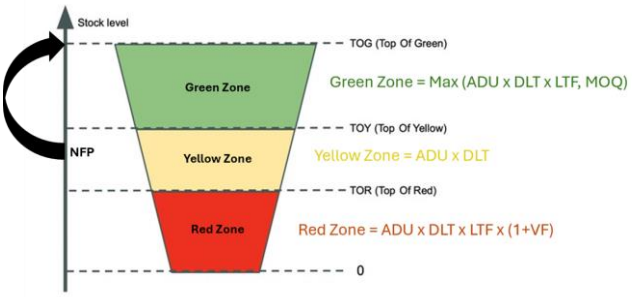


Figure 1: Buffer zones [Damand et al., 2023]

The systematic review by Azzamouri et al., [2021] presents the classification and advantages of DDMRP in various industries. It highlights the ability of DDMRP to improve inventory management, reduce out-of-stocks in manufacturing environments, and minimize lead times, thereby improving customer satisfaction through better alignment with actual demand. The review emphasizes that DDMRP enables manufacturers to achieve greater operational flexibility and cost reduction by minimizing reliance on forecasts. Finally, it argues that DDMRP helps companies manage supply chain disruptions more effectively by providing greater visibility and responsiveness.

Despite its advantages, the implementation of DDMRP remains complex and requires careful adaptation to the specific needs of each organization, especially given the variability of demand [Martin et al., 2018; Mecheter et al., 2022]. To our knowledge, no prior research has addressed the application of DDMRP in an AM system, making it a promising area for exploration in this rapidly evolving field.

2.2 Additive Manufacturing (AM)

AM has emerged as a transformative technology with the potential to reshape industries by offering a unique approach to manufacturing. AM refers to a set of processes that create three-dimensional objects by adding material layer by layer from digital models. This technology offers numerous benefits, including reduced waste, design flexibility, and the ability to produce complex and customized parts that traditional manufacturing techniques struggle to achieve. As a result, AM has attracted significant attention in industries such as aerospace, automotive, and healthcare due to its ability to optimize production processes, reduce costs, and enable greater customization [Alami et al., 2023; Mobarak et al., 2023].

One of the key advantages of AM is its ability to support on-demand production, especially for spare parts**.** Traditional spare parts management systems often rely on large

inventories and complex logistics, resulting in high inventory costs, long lead times, and overproduction. In contrast, AM enables for localized, just-in-time manufacturing that can significantly reduce inventory costs and eliminate the need for large-scale production runs. This capability allows manufacturers to increase flexibility, reduce waste, and meet highly personalized demand [Gopal et al., 2022].

The management of spare parts in the context of AM has been the subject of several recent studies. Chaaben et al, [2020] demonstrated that AM can effectively reduce lead times and inventory costs associated with spare parts by enabling production on-demand, thereby improving overall supply chain efficiency. This shift towards to on-demand production is increasingly seen as a way to streamline operations and reduce waste in the spare parts production process. Mecheter et al., [2022] proposed a hybrid model for the management of spare parts in which AM technologies are integrated into the inventory management systems. The model ensures that parts are produced only when needed, minimizing the risk of both stockouts and overstocking. Ekren et al. [2023**]** explore how AM can enhance the resilience, profitability, and competitiveness of e-commerce supply chains. This study evaluates how different deployment policies (reactive AM, proactive AM, and non-AM) affect the performance of an (s, S) inventory control policy in terms of cost and response time. The results highlight the benefits of AM, particularly the reactive policy, in improving supply chain performance and provide valuable managerial insights for optimizing operations and resilience in uncertain business environments.

Despite the growing body of research on AM, the integration of DDMRP with AM remains unexplored. To the best of our knowledge, this is the first study to investigate the capability of DDMRP in managing AM production.

3 DEVELOPMENT OF THE SIMULATION MODEL

3.1 Use case Specification

In this study, we considered a realistic use case involving the production of a robotic arm with well-defined specifications to closely replicate industrial manufacturing conditions. By selecting this specific product and fine-tuning production parameters, the case study enables the simulation of real-world challenges of an AM factory.

After selecting the product to be manufactured and exporting its geometry as an STL file, the model is imported into PrusaSlicer, a widely used slicing software. The slicing process begins by specifying the material to be used—in this case, PLA filament, selected for its practicality and reliability. The infill density is set to 15%, which affects the part's internal structure and strength. Key print parameters—such as layer height, print speed, and nozzle temperature—are then configured to match the material and desired print quality. Once configured, PrusaSlicer generates a slicing output that includes several technical indicators, notably the estimated total print time, which in this project is 3 hours and 31 minutes. This estimated print time is the value used as input in the simulation model to realistically define the processing time at the printing station. For further details on additive manufacturing processes, interested readers are referred to Gibson et al. (2021).

In this case study, we suppose that raw materials are infinite and that only the robotic arm, which corresponds to the Final Product (FP), is managed by DDMRP. Following the DDMRP logic (see Figure 2), for every customer order received, the model updates the Net Flow Position (NFP). If the customer order size is less than or equal to the On-Hand (i.e. the inventory in the warehouse), the customer order will be fulfilled and expedited immediately. Otherwise, the customer order will be delayed until sufficient stock is available. A production order is released only if the NFP is under the Top Of Yellow (TOY).

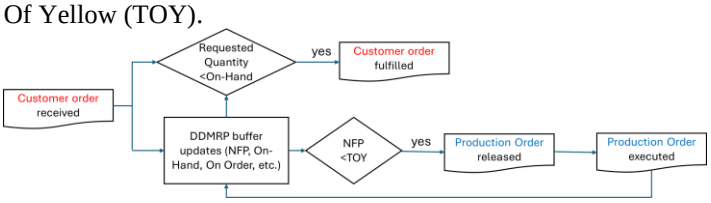


Figure 2: Management of customer orders and production orders according to DDMRP logic

Figure 3 presents an UML activity diagram illustrating the whole process including the different post and the 3D printers. Once the production orders are received at the setup station, raw materials are prepared, and the machine program is configured. If the 3D printer is available, it is activated; otherwise, printing proceeds according to the schedule. After printing is completed, the product undergoes assembly and painting, then the finished product is sent to the warehouse and the On-Hand level in the DDMRP buffers is updated.

3.2 Model implementation with Simio

Figure 4 presents a detailed simulation of a 3D manufacturing process modeled using SIMIO, which integrates five essential components to capture the entire production workflow. First, the Supply Station simulates the procurement of raw materials, such as PLA (polylactic acid), nuts, and PaintA, which are necessary for the production process. The second component, the Printing Station, represents the actual 3D printing operations, including the 3D printers themselves and the setup station, where preparation for printing occurs. After the printing is complete, the simulation moves to the Assembly Station, where the printed components are brought together and assembled into the final product. The next stage, the Painting Station, involves applying coatings or paint to the assembled items, ensuring they meet desired aesthetic or protective standards. Finally, the Warehouse Station represents the storage area where the finished products are held before being distributed to customers or other locations. This comprehensive simulation helps visualize and optimize the entire manufacturing process, providing valuable insights for efficient production management.

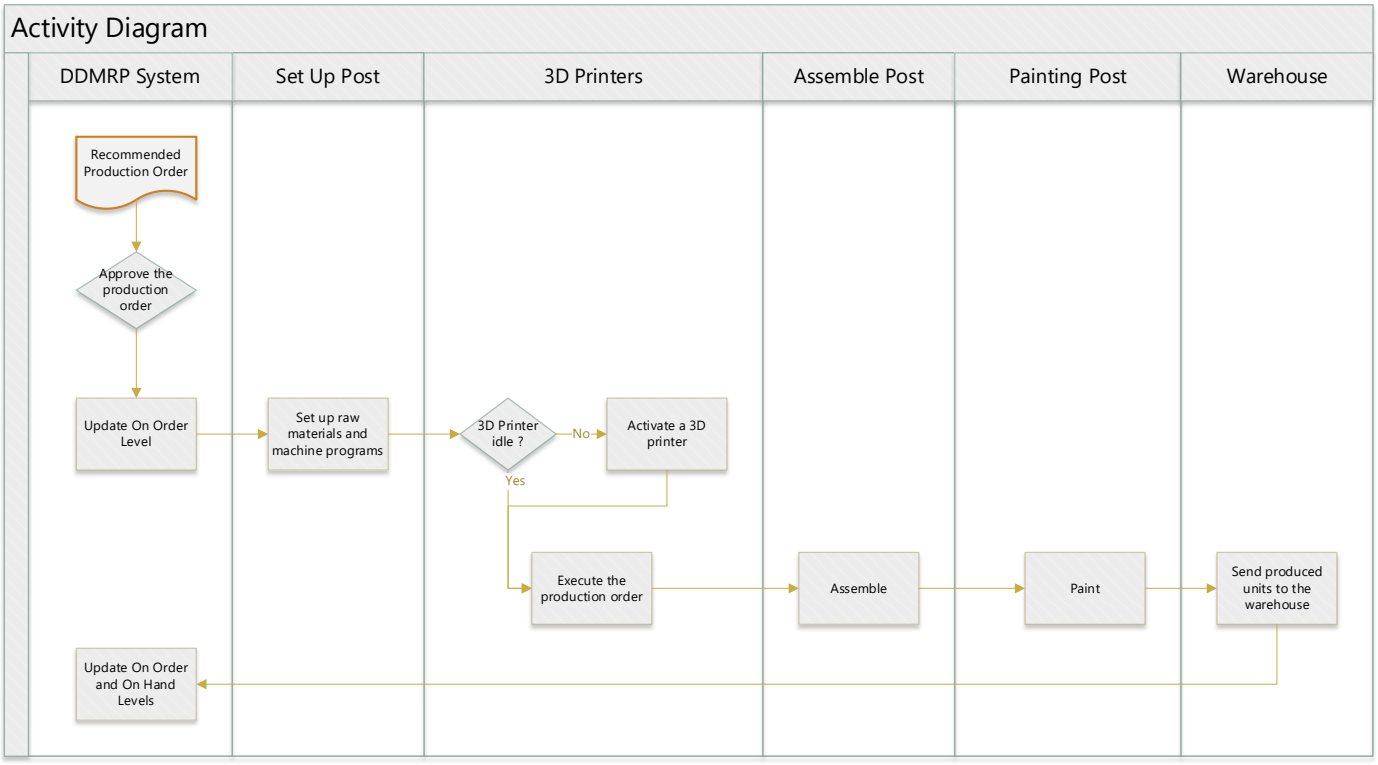


Figure 3. Activity diagram for production workflow

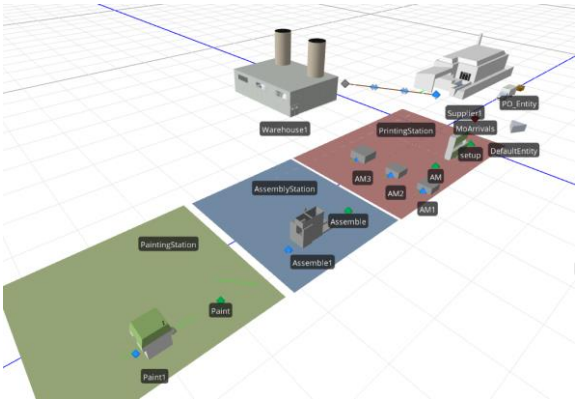


Figure 4. 3D overview of the factory

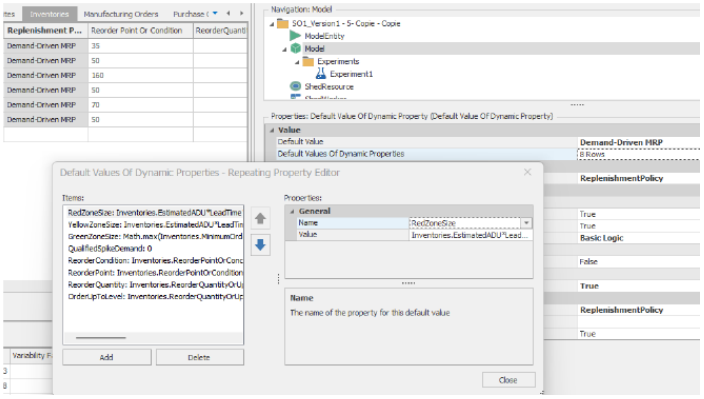


Figure 5. Inventories table

This structured modeling approach allows for a detailed analysis of each step in the manufacturing process, from the sourcing of raw materials to the storage of finished products. In this study, we employed the concept of 'data-generated' modeling, where the model is automatically generated by storing object data within tables like product structure table, Bill of materials table, resources table, Inventories table, etc. To better understand how this coding approach with Simio differs from the classic drag-and-drop methods, interested readers can consult Smith and Sturrock., [2023].

The "data-generated" modeling approach used to develop the inventory table (see Figure 5) can be explained as follows. Inventories table includes an inventory element that specifies the replenishment policy for a material/site combination as Demand-Driven MRP. The table also contains DDMRP-related parameters like Lead Time, Minimum Order Quantity, Desired Order Cycle, Buffer Profile information, and usage/spike horizons. If an inventory is managed with DDMRP, these parameters are used to create time-indexed output tables for demand-driven inventory calculations. Figure 5 presents the inventories table, as well as the DDMRP equations that are embedded within the simulation model.

Inspired by Dessevre et Benali. [2024], customer orders are generated as follows. Customer arrivals follow an exponential distribution at an order arrival rate of λ orders per day. The customer order size follows a normal distribution with a mean μ equal to (ADU/ λ) and a standard deviation equal to CV*μ, where CV is the Coefficient of Variation which represents the ratio of the standard deviation to the mean, and is used in this study to test different demand variability levels.

3.3 Simulation-Based Optimization

The use of simulation-based optimization has been recognized as a powerful approach to solve optimization problems while considering the complex, stochastic behavior of manufacturing and supply chain systems [Layeb et al., 2018]. From a simulation-based optimization perspective, a simulation model allows the evaluation of the system performance under different conditions and the identification of optimal solutions. Since the objective of this study is to investigate the ability of the DDMRP to effectively manage the complexity introduced

by AM, we propose to use the simulation model as a simulation-based optimization decision support tool to determine optimal configurations of the AM system that maintain high customer service levels while minimizing costs within the DDMRP framework.

In order to identify the optimal lead time and the number of 3D printers needed to ensure an adequate balance between cost and customer service level, while taking into account for demand variability, we apply the simulation-based optimization approach through OptQuest of Simio software and analyze how demand variability affects the system.

4 MODEL VALIDATION

Prior to the experimental step, we had to go through a rigorous validation process to confirm the reliability of the simulation model and its ability to produce stable and consistent results under the same conditions. Model validation ensures that the model can be trusted to deliver the same outcomes when run repeatedly. Based on Jaoua et al. [2024], we chose to validate the simulation model using deterministic settings. First, we rigorously validated some observed variables generated by the simulation model by removing the stochastic elements from the simulation and manually calculating the processing time of each production operation and some DDMRP indicators. To do this, we used an Excel spreadsheet to calculate "expected" values for processing times, the Net Flow Position (NFP), and buffer zone sizes. The values obtained in Excel were then compared with those generated by the simulation model. This comparison allowed to validate the reliability of the simulation model and confirm that the DDMRP indicators, such as the NFP and buffer zone sizes, are correctly calculated by the simulation model.

Results obtained in this validation step show that the bottleneck in the whole process remains the 3D printers, which are always running at maximum capacity. This is expected due to the longer processing times compared to other conventional machines. Despite this, we maintain a high service level, ensuring that customer orders ate fulfilled on time in 91% of the cases. In addition, the low volume of backorders reflects effective buffer management and overall production control.

Figure 4 illustrates the status of the final product DDMRP buffer in this validation step. We can see that the On-Hand quantity stabilizes around the Top Of Yellow (TOY) after a horizon of 3 months. Therefore, we consider this horizon as the warm-up period.

Figure 6. Buffer status for the final product

5 EXPERIMENTS AND ANALYSIS

In this study, we performed three main experiments exploring two key control parameters (the lead time and the number of 3D printers to activate in the system) under different demand scenarios. The simulation-based optimization approach enables to efficiently explore the solution space and identify the optimal decisions balancing two objectives: maximizing the customer service level (higher than 90%) and minimizing operating costs. OptQuest's optimization algorithms will guide the search for the best configurations ensuring that the system is both high performing and cost effective.

First, we identified the best configurations in two scenarios, considering respectively low and high demand variability. Then, we increased the order arrival rate to observe its effects on the system performance and the best configuration recommended by the simulation-based optimization tool.

5.1 Low demand variability scenario

In this first experiment, we considered a low Coefficient of Variation (CV), set at 0.2, and used Optquest to explore two key decision variables: 1) the number of 3D printers to activate, ranging from 1 to 8, and 2) the lead time, ranging from 0.5 days to 2 days. The optimization tool systematically tests all possible combinations of these two decision variables and determines which configuration provides the best balance between operating costs and customer service levels.

The simulation-based optimization tool recommends activating three 3D printers and setting the lead time to 0.5 days (12 hours). This setup ensures a service level of 91%, meeting the service goal while minimizing costs. Figure 7 illustrates the simulation results and the best configuration recommended by OptQuest.

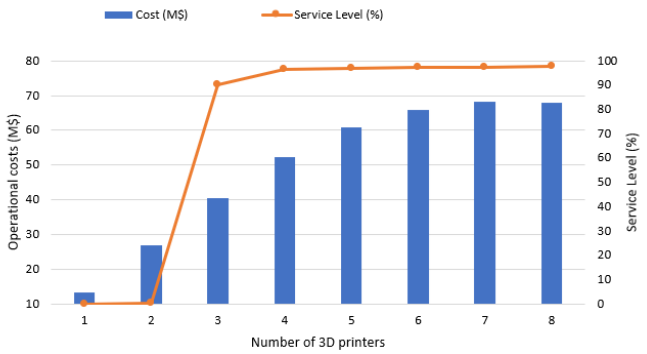


Figure 7. System performance under a low demand variability scenario

We can see in Figure 7 that the service level curve stabilizes starting from the activation of three printers, with only slight fluctuations due to lead time variations. However, the cost curve increases gradually, with an increasingly noticeable upward trend as the number of machines increases, combined with lead time variations. For the case of one and two 3D printers, we observe a very low service level, but from the point where three printers are activated, we achieve a high service level without the need to add more machines, ensuring the minimum possible cost to achieve a service level higher than 90%.

5.2 High demand variability scenario

In this second experiment, we considered a high CV, set to 0.6, and observed the effect of high variability on the optimal configuration recommended by the tool. As for the low demand variability scenario, we used Optquest to identify the optimal configuration that ensures a high service level while minimizing costs, despite the increased variability.

The simulation-based optimization tool recommends increasing the number of 3D printers to four and the lead time to 0.8 days (19.2 hours). This configuration achieves a service level of 91%, meeting the service goal while minimizing costs. An additional 3D printer, with obviously higher costs, and a longer lead time are requested to handle the higher variability. This can be seen in Figure 8, which shows the simulation results and the best configuration recommended by OptQuest.

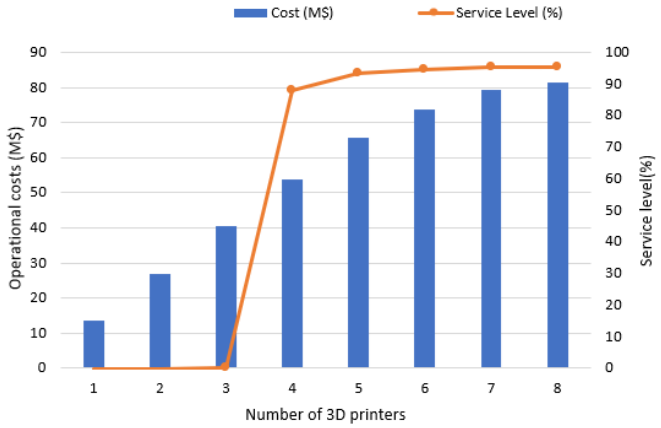


Figure 8. System performance under a high demand variability scenario

5.3 High demand variability scenario with higher order arrival rate

In this last experiment, we maintained the high demand variability scenario and we pushed the challenges further by increasing the order arrival rate to 8 orders per day. The objective is to assess the system ability to maintain acceptable performance under more challenging conditions. Figure 9 illustrates the simulation results and the best configuration recommended by OptQuest.

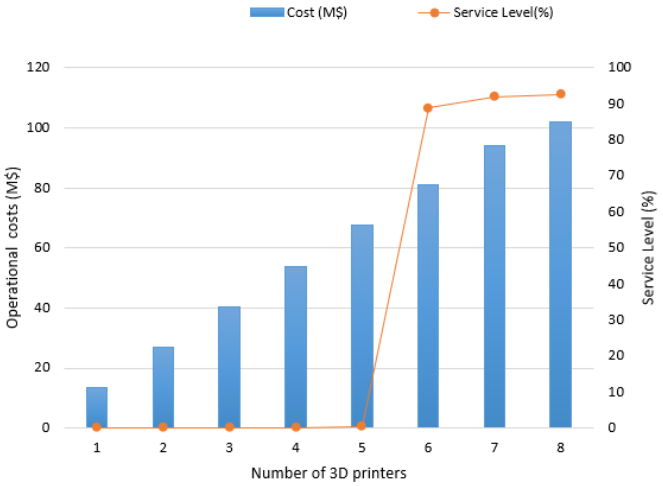


Figure 9. Impact of frequency on System KPI's

In this curve, we see that the 90% service level of 90% cannot be achieved with less than six 3D printers. This service goal is achieved at a significantly lower cost compared to the cases with seven or eight machines. Further costs associated with activating additional machines provide only a marginal increase in service level—around 4% —making such investment unnecessary in our case study. We can conclude that the best configuration recommended by the optimization tool of activating only six of the available eight machines, with a lead time of 36 hours, ensures that the system is both high performing and cost effective.

In summary, as the order arrival rate increases, total costs also increase because more 3D printers must be activated and more quantities must be produced to fulfill customer orders on time. However, these measures are essential to maintain the target service level under high demand variability.

6 CONCLUSION AND FUTURE WORKS

Improving customer service levels is a common goal for both Demand Driven Material Requirements Planning (DDMRP) and Additive Manufacturing (AM), although they approach it in different ways. In both cases, the goal is to ensure that production processes meet customer demands on time, without overproduction, and in a way that optimizes resources.

In this paper, we investigated the ability of the DDMRP to effectively manage the complexity introduced by AM. For this purpose, we developed a simulation model of a realistic system involving the production of a robotic arm with well-defined specifications to closely replicate AM industrial manufacturing conditions. We assumed that this single product is managed by DDMRP and thus production orders are released based on the Net Flow Position (NFP). Then we couple this simulation model with an optimization tool to determine optimal

configurations of the AM system that maintain high customer service levels while minimizing costs within the DDMRP framework. The developed simulation-based optimization decision support tool allows to determine the optimal lead times and the number of 3D printers needed under different demand scenarios, providing flexibility beyond what static models can provide. In addition, it enables analysis of the impact of demand variability and the order arrival rate on the optimal configurations requested to maintain the target service level.

Simulation results show that under challenging demand scenarios, higher investments in 3D printers are required to achieve acceptable service levels, and longer lead times are required to meet customer demands. Since processing times are a notable constraint for 3D printing, this paper proposes the integration of the DDMRP to efficiently manage production orders and a tool for optimizing production system configurations in a way to reduce the impact of bottlenecks caused by the 3D printers.

This work is a first step in demonstrating the performance of DDMRP in AM systems. The knowledge gained from this study will serve as a foundation for future enhancements, ensuring that decision makers can effectively respond to the challenges of fluctuating demand and evolving production environments.

7 REFERENCES

Haleem, A., & Javaid, M. (2019). Additive manufacturing applications in industry 4.0: a review. Journal of Industrial Integration and Management, 4(04), 1930001.

Mecheter, A., Pokharel, S., & Tarlochan, F. (2022). Additive manufacturing technology for spare parts application: A systematic review on supply chain management. Applied Sciences, 12(9), 4160.

Cadiou, T., Demoly, F., & Gomes, S. (2022). A multi-part production planning framework for additive manufacturing of unrelated parallel fused filament fabrication 3d printers. Designs, 6(1), 11.

Damand, D., Lahrichi, Y., & Barth, M. (2023). Parameterisation of demand-driven material requirements planning: a multi-objective genetic algorithm. *International Journal of Production Research*, *61*(15), 5134-5155.

El Marzougui, M., Messaoudi, N., Dachry, W., Sarir, H., & Bensassi, B. (2020, November). Demand Driven MRP: Literature review and research issues. In 13ème Conférence internationale de modélisation, optimisation et simulation (MOSIM2020), 12-14 Nov 2020, Agadir, Maroc.

Dessevre, G., & Ben Ali, M. (2024). Analysis of a new dynamic capacity management approach in DDMRP: Application on a real industrial case. *Journal of Industrial Engineering and Management*, *17*(2), 445-462.

Martin, G., Baptiste, P., Lamothe, J., Miclo, R., & Lauras, M. (2018, June). Vers une cartographie de processus explicite pour le modèle Demand Driven Adaptive Enterprise. In MOSIM'18-12ème Conférence internationale de Modélisation, Optimisation et SIMulation (pp. 13-p).

Duhem, L., Benali, M., & Martin, G. (2023). Parametrization of a demand-driven operating model using reinforcement learning. *Computers in Industry*, *147*, 103874.

Alami, A. H., Olabi, A. G., Alashkar, A., Alasad, S., Aljaghoub, H., Rezk, H., & Abdelkareem, M. A. (2023). Additive manufacturing in the aerospace and automotive industries: Recent trends and role in achieving sustainable development goal

Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B., Khorasani, M., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). Additive manufacturing technologies (Vol. 17, pp. 160-186). Cham, Switzerland: Springer.

C. Ptak and C. Smith. Demand driven material requirements planning (ddmrp). In Norwalk, CT: Industrial Press, 2016"

Azzamouri, A., Baptiste, P., Dessevre, G., & Pellerin, R. (2021). Demand driven material requirements planning (DDMRP): a systematic review and classification. Journal of Industrial Engineering and Management, 14(3), 439-456.

Mohammad, F. H., Benali, M., & Baptiste, P. (2022). An optimization model for demand-driven distribution resource planning DDDRP. *Journal of Industrial Engineering and Management*, *15*(2), 338-349.

Gopal, M., Lemu, H. G., & Gutema, E. M. (2022). Sustainable additive manufacturing and environmental implications: literature review. Sustainability, 15(1), 504.

Mobarak, M. H., Islam, M. A., Hossain, N., Al Mahmud, M. Z., Rayhan, M. T., Nishi, N. J., & Chowdhury, M. A. (2023). Recent advances of additive manufacturing in implant fabrication–A review. Applied Surface Science Advances, 18, 100462.

Chaaben, A., El Arbi, A., & Tazerout, M. (2020). Optimizing spare parts management with Additive Manufacturing in supply chains. MOSIM 2020 Conference Proceedings, 15-28.

Ekren, B. Y., Stylos, N., Zwiegelaar, J., Turhanlar, E. E., & Kumar, V. (2023). Additive manufacturing integration in E-commerce supply chain network to improve resilience and competitiveness. Simulation Modelling Practice and Theory, 122, 102676.

Layeb, S. B., Jaoua, A., Jbira, A., & Makhlouf, Y. (2018). A simulation-optimization approach for scheduling in stochastic freight transportation. Computers & Industrial Engineering, 126, 99-110.

Smith, J. S. and D. T. Sturrock. 2023. Simio and Simulation: Modeling, Analysis, Applications. 6th ed. Pittsburgh: Simio LLC.

Jaoua, A., Negri, E., Jaoua, M., & Benkirane, N. (2024, December). Novel Methods for Teaching Simulation: Strengthening Digital Twin Development. In 2024 Winter Simulation Conference (WSC) (pp. 3169-3180). IEEE.

CIGI QUALITA MOSIM 2025

Stochastic multistage green investment of capital-constrained manufacturing system considering green subsidies and the cap-and-trade market

MERIAM NEFZI[1], ADNENE HAJJI[2] , DAOUD AIT KADI[1]

[1] Department of Mechanical Engineering & CIRRELT. Laval University.
1045, avenue de la Médecine Québec (Québec) G1V 0A6, Canada

meriam.nefzi.1@ulaval.ca
daoud.aitkadi@gmc.ulaval.ca

2 Department of Operations and Decision Systems & CIRRELT. Laval University
2325, rue de la Terrasse, Québec (Québec), G1V 0A6, Canada

adnene.hajji@fsa.ulaval.ca

Abstract – **Emissions trading within the cap-and-trade (C&T) system significantly impacts industrial companies, requiring them to adopt strategies to reduce emission levels. However, the dynamic nature of the system and the stochastic behavior of market demand make this decision complex. To address this challenge, we develop a large-scale stochastic optimization model that optimizes green technology investments in multi-period setting. The model integrates both strategic and tactical decisions for a capital-constrained manufacturing company operating under a C&T system. Scenario trees are employed to represent the uncertainty in market conditions, while the stochastic dual dynamic programming (SDDP) method is applied to mitigate the curse of dimensionality. The investment decisions, the dynamics of cap and trade and the production decisions are evaluated in a series of multistage case studies. The results show that the proposed decision model provides effective optimization solutions for long-term green investment planning.**

Keywords – **Green investment, Cap-and-trade, SDDP, Stochastic demand**

1 INTRODUCTION

Global warming and environmental challenges are critical issues that demand urgent attention. Aligned with the Paris Agreement's climate action goals, Canada has committed to achieving net-zero greenhouse gas (GHG) emissions by 2050 [ECCC, 2020]. Among the key contributors to global emissions, the manufacturing sector plays a significant role, largely due to its heavy reliance on fossil fuels for energy-intensive processes [Dragomir et al., 2023]. Hence, the transition to renewable energy sources presents a major opportunity for reducing emissions, as electricity contributes 6% to 63% of total GHG emissions in various manufacturing processes [Nicholson et al., 2023]. As a typical energy-intensive sector, the primary aluminum industry (PAI) ranks as the third largest contributor to greenhouse gas (GHG) emissions, after the electricity and steel industries [Shahin et al., 2024]. Energy-intensive sectors face the dual challenge of maintaining productivity while adhering to environmental responsibilities. Despite the growing emphasis on sustainability, many manufacturers continue to prioritize operational efficiency over emission reduction efforts [Wang et al., 2024]. Large companies, in contrast to small and medium-sized enterprises (SMEs), have greater responsibilities to adopt green practices. Many SMEs in the aluminum sector are increasingly recognizing the importance of investing in cleaner technologies. For example, Alcoa, Rio Tinto, and the Canadian government collectively invested $188 million in the Elysis carbon-free aluminum project. To foster collaboration, Apple, the global technology leader, contributed $13 million and agreed to provide technical support for the initiative [Shen & Zhang, 2024]. Governments and regulators play a pivotal role in promoting green technology adoption through mechanisms like subsidies and C&T systems. C&T is a market-based approach to controlling GHG emissions, setting a cap on total emissions while allowing companies to trade allowances. This system incentivizes emissions reduction in a cost-effective manner and encourages the transition to greener alternatives [Avval et al., 2023]. Despite these efforts, balancing sustainability with financial viability remains a significant challenge, particularly for SMEs facing capital constraints. Green subsidies have emerged as critical tools for addressing these barriers, enhancing corporate green innovation, and improving resource allocation [An et al., 2025]. This shift is particularly evident in the aluminum sector, where low-carbon aluminum is preferred in industries like e-mobility. Secondary aluminum alloys, with a carbon footprint up to 20 times lower than primary metals, promote CO2 savings and efficient recycling, making them a crucial component of sustainable manufacturing [Fracchia & Mus, 2024].

This paper explores the strategic and tactical decisions of capital-constrained manufacturers in transitioning from conventional technologies to renewable alternatives by 2050. Specifically, it examines the factors influencing their investments in sustainable operations and their production decisions in a multi-period setting.

2 RELATED LITERATURE

The impact of cap-and-trade mechanisms on investment and operational decisions is widely studied. The study by Zhou et al. [2016] examined the interplay between manufacturing and remanufacturing decisions under capital constraints and carbon pricing regulations. Zhang et al. [2020] explore how different allowance allocation methods can influence green technology investments and market pricing strategies.

Wang and Li [2024] investigated the role of uncertainty in government subsidies on fleet replacement decisions. Similarly,

Sun et al. [2022] analyzed how emissions trading schemes influence responsible sourcing and production planning decisions. Garcia-Alvarado et al. [2016] used a mixed-integer linear programming (MILP) program to draw the relationship between green capacity expansion, production, and inventory strategies under a carbon cap and trade scheme.

Carbon risk management and financial decision-making are discussed in the study by Yang et al. [2022], which proposes a stochastic framework for managing carbon-related financial risks. Furthermore, several studies addressed decision-making for renewable energy investments. Wang et al. [2024] present hybrid uncertainty modeling for low-carbon energy distribution. Liu and Zhang [2016] examine decision-dependent stochastic programming for large-scale wind power integration.

The study by Zhang et al. [2024] highlighted the role of flexible carbon capture and storage in achieving low-carbon economic dispatch strategies. The work by Zhang et al. [2024] explored decomposition methods for solving investment problems under constraints. Similarly, Li and Wang [2024] introduce stochastic dual dynamic programming to improve power flow optimization under uncertainty.

Energy management strategies are also explored in the study by Chen et al. [2024], which presents a decision-making framework for shared energy storage. Additionally, Liu et al. [2024] investigated cooperative planning models for optimizing shared energy storage operations in integrated energy systems.

One of the key methodologies employed in the stochastic modeling of power systems is stochastic dual dynamic programming (SDDP), which is widely used for solving multi-stage decision problems under uncertainty.

Dual Stochastic Dynamic Programming (SDDP) is an extension of Stochastic Dynamic Programming (SDP). The main drawback of the SDP method is the exponential increase in the computation time and the memory necessary to solve the optimization problem by increasing the size of the problem, which is the curse of dimensionality. The resolution time increases exponentially with the number of state variables. SDDP decomposes the stochastic optimization problem into a series of sequential sub-problems. Each sub-problem is an optimization problem that chooses an action to minimize the cost associated with the current decision, as well as the cost remaining to make the remaining steps according to the action undertaken. Unlike deterministic mathematical programming, SDDP does not provide a solution containing an explicit optimal value for each variable. Instead, it builds a policy in the form of a linear program. To obtain optimal control for a step, the user defines the value of the state variable, the realization of the random variable, and solves the approximate linear program. This method was first presented by Pereira and Pinto [1991] and received worldwide notoriety thereafter. It has been used as a management tool in several hydroelectric systems in the world. The deterministic equivalent of this problem is obtained by discretizing ξ. The number of variables in this problem increases exponentially with the number of steps.

Sampling-based algorithms typically assume stage-wise independency, which guarantees that the cost-to-go functions depend solely on the current time stage, i.e., a cut calculated for a particular scenario is also valid for any other scenario at that same time stage.

The SDDP algorithm essentially consists of two procedures: one forward in time and one backward in time. The forward procedure of the SDDP algorithm is carried out by sampling a subset of scenarios from a finite scenario tree and running a forward-in-time simulation for each one of the sampled scenarios. The most important feature of the forward procedure is providing trial decisions for the backward step of the algorithm; it can also be used to evaluate an upper bound for the policy value.

The backward procedure of the algorithm is performed backward in time; its objective is to estimate the cost-to-go function for each trial decision given by the forward procedure. Details of the algorithm can be found in many works, including Pereira and Pinto [1991] and Shapiro et al. [2011].

The idea of the algorithm is to quickly zoom in on the relevant parts of the value functions and avoid spending unnecessary time approximating the value function around decisions that are not of interest.

3 PROBLEM STATEMENT

In this section, we present the multiperiod production planning problem incorporating a carbon cap-and-trade mechanism and green subsidies. A capital-constrained manufacturer must decide on a portfolio of production technologies to meet stochastic demand.

Decisions related to environmental project investments are centralized at the strategic level, while tactical decisions focus on sales, production and inventory management, and carbon management strategies.

The planning horizon T, is finite and consists of a series of three-year compliance periods, denoted by c = 1, ..., C. The start of each compliance period is denoted by t_c. We define the set of initial periods as $T_c \subset T$. Additionally, a set T_a represents the auction periods, $t_a = 1, ..., T_a$, which occur quarterly throughout each year.

As illustrated in Figure 1, each compliance period is composed of 12 auction periods t_a and an initial period t_c.

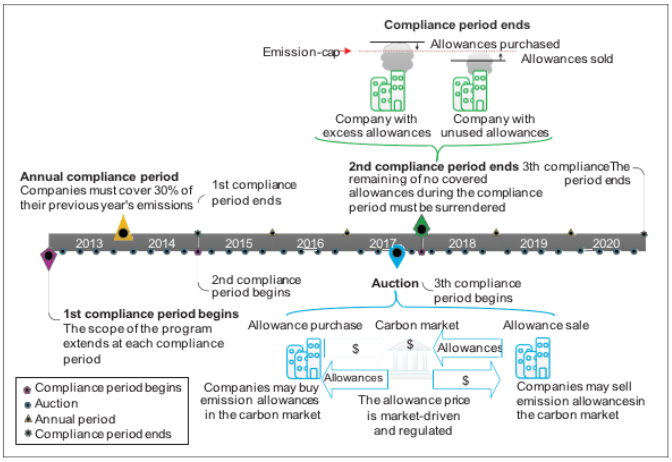


Figure 1. Dynamics of Quebec's cap-and-trade system from California Air Resources Board (2014)

Sets	Description
C	Set of compliance periods
I	Set of green technologies
T	Set of planning periods T=$T_c + T_a$
$T_a \subset T$	Set of the auction periods
$T_c \subset T$	Set of the beginning of compliance periods
Parameters	**Description**
C_C	Conventional manufacturing capacity
$C_{i,0}$	Green technology i's initial capacity
K_s	Inventory capacity
Cap_t	Emission cap per period t
e_c	Carbon emission per product produced with conventional technology in tCO2
e_i	Carbon emission per product produced with green technology i in tCO2
$.s$	Subsidy rate $0 \leq s \leq 1$
LR_i	Green technology i's learning rate
$\alpha_{penality}$	Non-Compliance penalty factor
α_{cap}	Carbon price factor
α_{carbon}	Cap reduction factor
IY_i	Green technology i's year of introduction
K	Budget Limit
Costs	**Description**
R_t	Selling price for products per period t
C_{h_t}	Holding cost per unit per period t
$PC_{c,t}$	Manufacturing cost per unit manufactured by conventional technology per period t
$PC_{i,t}$	Manufacturing cost per unit manufactured by green technology i per period t
$invest_{i,t_c}$	Investment cost of green technology i per compliance period t_c
L_t	Lost sale cost per unit per period t
Cxe_t	Carbon credit purchase price per period t
Cye_t	Carbon credit selling price per period t
p_{t_c}	Penalty tax per compliance period t_c
Decision variables	**Description**
$XP_{c,t}$	Quantity of products manufactured in period t by conventional technology
$XP_{i,t}$	Quantity of products manufactured in period t by green technology i
$X_{L\,t}$	Quantity of products lost in period t
$G_{i,t}$	Proportion of capacity newly added from green technology i in period t
$C_{i,t}$	Green technology i's cumulative capacity at period t
Xe_t	Carbon credits bought in period t
Ye_t	Carbon credits sold in period t
Ag_t	Number of carbon credits possessed by company in period t
$CO2_t$	Emissions level in period t
S_t	Inventory level in period t
D_t	Stochastic demand of products in period t

Under the cap-and-trade system, at the beginning of each compliance period c ∈ C, a given amount of allowances, denoted as Cap_t, is freely allocated to the system. This cap is progressively reduced over successive compliance periods.

$$Cap_{t+1} = (1 - \alpha_{cap})\, Cap_t \quad t \in T_c \tag{1}$$

During each auction period $t_a \in T_a$, participants can purchase emissions Xe_t or sell emissions Ye_t on the carbon market at prices Cxe_t and Cye_t , respectively. It is assumed that $Cye_t < Cxe_t$ throughout all compliance periods. Additionally, carbon prices gradually increase over the course of the auction periods.

$$Cye_t = (1 + \alpha_{carbon})\, Cye_t \qquad t \in T_a \tag{2}$$

$$Cxe_t = (1 + \alpha_{carbon})\, Cxe_t \qquad t \in T_a \tag{3}$$

The compliance account level Ag_t must reflect the required level of allowances for each compliance period. If a company exceeds its freely allocated allowances or has a surplus, it can buy or sell carbon allowances during quarterly auction periods held throughout the year. By the end of the compliance period, mandated limits. To meet this requirement, the manufacturer must maintain a positive balance in the compliance account Ag_t.

$$Ag_t = \begin{cases} Cap_t & if\ t \in T_C \\ Ag_{t-1} + Xe_t - Ye_t - CO2_t & otherwise \end{cases} \tag{4}$$

where $(Ag_t)^- = \max(0, -Ag_t)$.

Failure to comply may result in a penalty tax p_{t_c} imposed by authorities, which is proportional to the compliance account balance $p_{t_c}(Ag_t) -$. This penalty is also influenced by fluctuations in carbon prices, reflecting the dynamic nature of the carbon market.

$$p_{t+1} = \left(1 + \alpha_{penality}\right)\, p_t \; t \in T_c \tag{5}$$

To avoid purchasing additional allowances or facing penalties, manufacturers must reduce their emissions. Therefore, they need to invest in green technologies.
The manufacturer has a range of available technologies, each characterized by its investment cost, production cost, year of introduction, carbon emissions, and learning rate.
These technologies include both existing solutions and emerging green technologies that have not yet been commercialized.

Therefore, for each green technology $i \in I$, we define:
$C_{i,0}$: Green technology i's initial capacity
$C_{i,t}$: Green technology i's cumulative capacity at period t
LR_i : Green technology i's learning rate
$PC_{\mathrm{i,t}}$: Manufacturing cost per unit manufactured by green technology i at period t
$e_{\mathrm{i,t}}$: Carbon emission per product produced with green technology i at period t in tCO2
IY_i : Green technology i's year of introduction

$invest_{i,t}$: Green technology i's unit investment cost per period t

We assume that the investment cost will decrease over time as a result of ongoing research and development in green technology.

Therefore,

$$invest_{i,t+1} = \begin{cases} invest_{i,t}(1 - LR_i)\ if\ t \in T_c \\ invest_{i,t}\ \ otherwise \end{cases} \quad (6)$$

As part of their strategic planning, investment decisions are made at the beginning of each compliance period.

$$C_{i,t+1} = \begin{cases} C_{i,t} + G_{i,t}\ \ if\ t \in T_c\ , \quad t \geq IY_i \\ C_{i,t} \quad otherwise \end{cases} \quad (7)$$

Since the manufacturer is capital-constrained, all investments in green technologies must stay within the budgetary limits. Let consider K is the green investment budget.

$$\sum_i G_{i,t} \times invest_{i,t} \leq K,\ t \in T_c \quad (8)$$

Governments can reduce barriers to adopting green energy by offering subsidies for investments in green technologies. These subsidies provide financial support to promote sustainable operations and offer incentives to reduce pollution.
In our model, we incorporate an investment tax credit, which represents a percentage of the total investment in cleaner technologies, denoted as the subsidy rate s.

In each auction period, the manufacturer can opt to use either conventional or green technologies, or a combination of both, to produce products.

The products produced by different technologies are stored at a central stocking point, where the inventory level S_t incurs a holding cost, H_t. Despite being manufactured through distinct processes, all technologies yield products of the same quality.
Demand is met from the available inventory. A dummy capacity, equal to the demand, is included to ensure it is always satisfied. The operational cost associated with this capacity reflects the social and economic costs of failing to meet the demand, commonly known as the lost sales cost L.

$$S_{t+1} = S_t + \sum_i XP_{i,t} + XP_{c,t} - D_t + X_{L\,t} \quad t \in T_a \quad (9)$$

In each production run, the manufacturer pays a variable production cost per unit $PC_{\mathrm{i,t}}$ and $PC_{\mathrm{c,t}}$. When producing one unit of products, the dirty and green technologies emit e_{c} and e_{i} emissions, respectively.
At the beginning of each compliance period, the emission function is set to zero.

During each compliance period, the total emissions is expressed as:

$$CO2_t = \begin{cases} 0 & if\ t \in T_c \\ CO2_{t-1} + \sum_{i=1}^{I} e_i XP_{i,t} + e_c XP_{c,t} & otherwise \end{cases} \quad (10)$$

Objective function and constraints

The sequence of events is as follows. At the beginning of each compliance period $t_c \in T_c$, the authorities set the new compliance cap, review the company's adherence to previous requirements, and decide if a penalty is due. Investments in green technologies $i \in I$ are evaluated and made as applicable, and benefits from these projects are realized immediately within the same period. At the start of each auction period $t_a \in T_a$, demand is revealed, inventory levels are reviewed, and manufacturing orders from different technologies are placed based on demand and available inventory. Sales are made accordingly. The compliance account is also reviewed at the start of each auction period to determine whether allowances need to be purchased or sold, with these transactions occurring instantly.

The objective function (11) to be maximized is the total profit calculated as follows:

$$\begin{aligned} Max \sum_{t \in T_a} R_t D_t - \sum_{t \in T_a} PC_{\mathrm{c,t}}\, XP_{c,t} - \sum_{i \in I} \sum_{t \in T_a} PC_{\mathrm{i,t}} XP_{i,t} \\ - \sum_{t \in T_a} H_t\, S_t - (1 - s) \\ - \sum_{i \in I} \sum_{t \in T_c} invest_{i,t} G_{i,t} - \sum_{t \in T_a} L\, X_{\mathrm{L}\,t} \\ - \sum_{T_c} p_t (Ag_t)^- - \sum_{t \in T_a} C_{X e_t} X_{e_t} \\ + \sum_{t \in T_a} C_{Y e_t} Y_{e_t} \end{aligned}$$

In the above profit function, the first term is the revenue generated from selling the product to the market, the second and the third term is the production cost from conventional and green technologies, the fourth term is inventory cost, the fifth term the sustainability investment cost. The lost sale cost is represented by the sixth term. The seventh term is the penalty for noncompliance with the cap-and-trade regulation. The last two terms are the cost or revenue from buying or selling the extra allowances of the emission.
This function is subject to (1) to (10) constraints. Additional constraints are as follows:
Constraint (12) expresses upper limits on the amount of lost sales per period, lost sales cannot exceed demand during any period.

$$X_{L\,t} \leq D_t \qquad \forall t \in T_a \quad (12)$$

Constraints (13) and (14) ensure that the total of unit produced by conventional and green technologies at each period respects the production capacity.

$$XP_{i,t} \leq C_{i,t} \qquad \forall t \in T_a\ \forall i \in I \quad (13)$$

$$XP_{c,t} \leq C_{C,t} \qquad \forall t \in T_a \quad (14)$$

The maximum inventory level of the warehouse must be respected.

$S_t \leq C_{S,t} \qquad \forall t \in T_a$	(15)

Finally, constraints (17) are non-negativity constraints on the decision variables.

$G_{i,t}, Xe_t, Ye_t, S_t, XP_{i,t}, XP_{c,t}, X_{L\,t}, CO2_t$ $\forall t \in T \quad \forall i \in I$	(16)

4 ILLUSTRATIVE EXAMPLE

A case study is considered to examine the advantages of the proposed method and to analyze the economic and environmental impacts of various influencing factors. We focused on aluminum industry in the U.S. and Canada. The aluminum industry is known for being energy-intensive and emitting significant amounts of greenhouse gases.

The global CO2e emissions per ton of primary aluminum (t Al) (GHG emission intensity) of PAI rose from 16.91 t CO2e/t Al in 2005 to 18.04 t CO2e/t Al in 2007 and remained at a high level above 17 t CO2e/t Al before 2014 (Shen & Zhang, 2024). The GHG emission intensity has begun to decline since 2015 and dropped to 16.6 t CO2e/t Al in 2021.

We studied the compliance periods 2025-2027/2028-2030/2031-2033/2034-2036/2038-2039/2040-2042/2043-2045/2046-2049.

In this case study, the company uses Gas Turbine Reserves as its conventional (or 'dirty') technology. We have selected Solar Photovoltaic technology as the current alternative green technology GT. We used technical data provided in Table. The future new technology (NGT) is more cost-effective and emission-efficient than the current green technology GT.

Table 1.Per-Megawatt Hour Costs and Emissions Intensity for Select Power Generation technologies from Drake et al. (2016)

Technology	Firm's levelized investment cost β_i	Firm's fixed O & M cost γ_i	Firm's direct prod. cost b_i	Emissions intensity α_i
Solar Photovoltaic	$109.8	$11.4	$0	0.00 tons
Combined Cycle Gas	$15.9	$2.0	$53.6	0.40 tons
Combined Cycle Gas CCS	$30.1	$4.2	$64.6	0.05 tons
Gas Turbine Reserves	—	—	—	0.42 tons

Table 2. Environmental parameters

Cxe_1=Cye_1	40$	Cap_1	50.000 tCO2
α_{carbon}	0.8%	α_{cap}	7%
e_c	16.00 tCO2/ton	IY_{GT}	2025
$e_{GT} = e_{NGT}$	0 tCO2/ton	IY_{NGT}	2034
s	80%	LR_i i=NGT, GT	10%

Table 3. Costs and capacities

R_t	$2500/ton	L_t	$700/ton
$invest_{CT,2025}$	4000$/ton	$invest_{GT,2025}$	$5800/ton
$invest_{NGT,2040}$	3000$/ton	$PC_{NGT,t}$	$1500/ton
$PC_{c,t}$	$1900/ton	$PC_{GT,t}$	$1600/ton
K_s	1,500 tons	$C_{h,t}$	$130/ton

4.1 SDDP application

Our model is a Hazard-Decision model as the state variables are determined in a non-anticipative way, so the random data is realized at the start of each stage before the decisions are chosen. A multistage stochastic programming model is applied to study the sequential investment, production and emission trading decisions with the demand uncertainties revealed gradually over time.

A scenario tree with 2 scenarios per stage with 96 stages is constructed using Optimistic and pessimistic value of market demand (D_p, D_o)=(6000,8000) to create inter-stage independent scenarios at each stage. The SDDP is applied to the scenario tree to obtain the policy (collection of Benders cuts at each stage).

To compare the impact of different adaptative strategies, a policy evaluation analysis is performed by generating 10000 independent and random forward paths to represent future possible scenario realizations for the demand uncertainty.

Overall, the results suggest that investments in low-carbon alternatives not only enhance emission reductions but also strengthen economic benefits by improving profits.

Investment decisions

Over the 10,000 scenarios tested to explore the policy driven by applying SDDP in our model, as shown in Figure 2, we observe that green investments in GT are made earlier. After the emergence of NGT in most scenarios, the company does not make large investments in the same year. Instead, a significant investment is considered in the next compliance period (Figure 3).

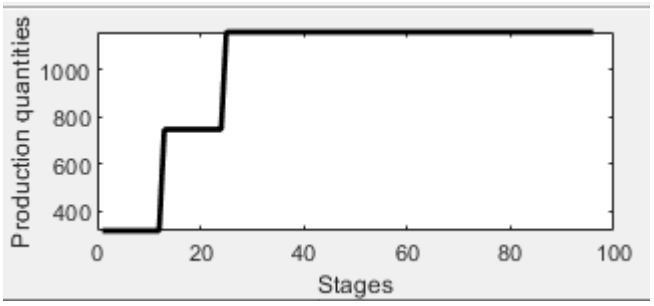


Figure 2. Investment decisions in GT

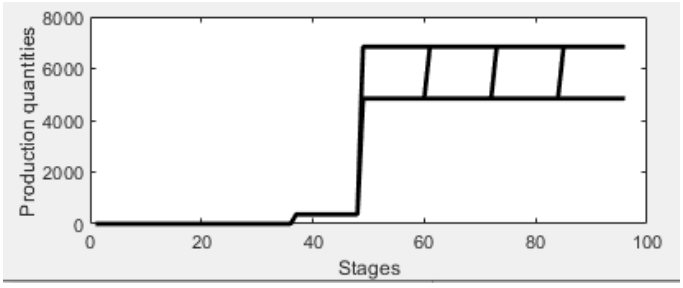


Figure 3. Investment decisions in NGT

Production strategy

Before the massive introduction of NGT in stage 48 (the begging of the compliance period 2036-2038)), the company relies heavily on its Conventional Technology (CT) to meet market demand as shown in Figure 6.

As shown in Figure 4 and 5, after the 2039-2041 compliance period, we observe that the maximum investment in NGT corresponds to the mean expected market demand. Therefore, in scenarios where demand is below the mean value, the policy indicates production using NGT. When demand exceeds NGT capacity, the company first meets the shortfall using its GT capacity, and if that is insufficient, it supplements production with conventional technology.

This phased approach allows the company to balance risk and sustainability, ensuring that it can meet demand while reducing its environmental impact over time.

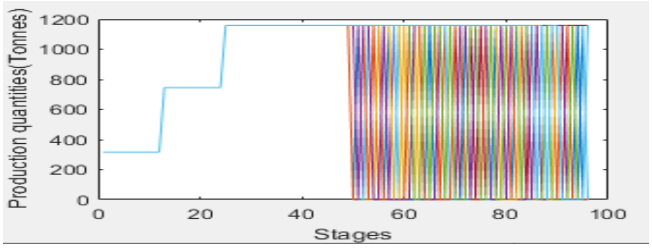


Figure 4. Production decisions with GT

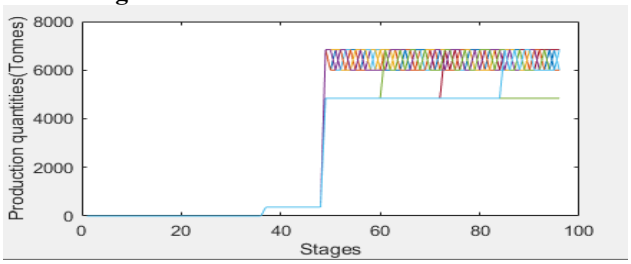


Figure 5. Productions decisions with NGT

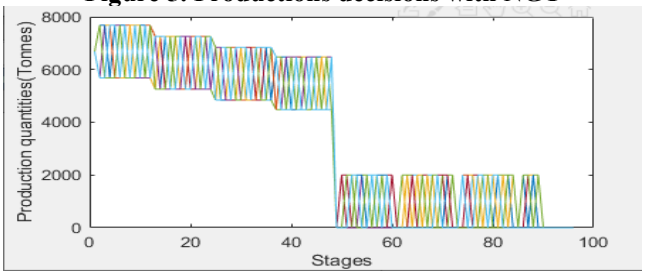


Figure 6. Production decisions with CT

From the beginning of the 2046 compliance period, when the cap-and-trade requirements become stricter any demand that cannot be met by green technologies (GT and NGT) is lost, and the company abandons its Conventional Technology (CT) entirely. This marks a pivotal shift in the company's operations, as it fully commits to green technologies to comply with stricter regulations and avoid penalties (Figure 7).

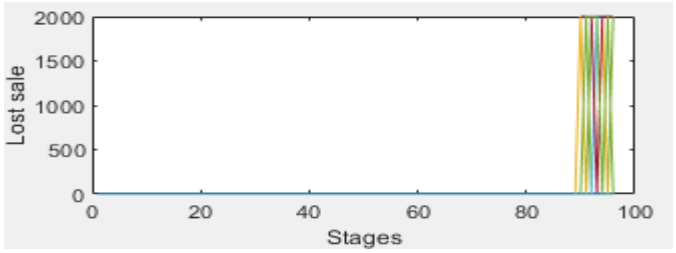


Figure 7. Lost sale decisions (in ton)

4.2. Discussion

4.2.1. Impact of green investment

We measured the firm's production costs and carbon footprint in terms of the environmental impact of its production processes. In Scenario 2, the only strategy for carbon abatement is the loss of sales.

Table 4 presents the production and environmental costs for two scenarios. When green investments are implemented, the average production cost decreases by 16.24%, equivalent to $188,510,000 over the entire planning horizon.

Table 4. Production and environmental per for S1 and S2

	S1	S2
Production cost ($)	972,290,000	1,160,800,000
Emission level (tCO2)	4,011,600	9,775,300
Compliance cost ($)	153,270,000	378,430,000
Trading revenue ($)	5,384,900	-

Additionally, investments in carbon-reduction projects and the transition to greener alternatives significantly reduce carbon footprint levels. On average, greenhouse gas (GHG) emissions are reduced by 58.96%, equivalent to 5.763 MtCO2 over the planning horizon. This substantial reduction in emissions not only lowers compliance costs but also creates opportunities to benefit from additional carbon allowances, generating further revenue.

4.2.2. Impact of year of introduction of NGT

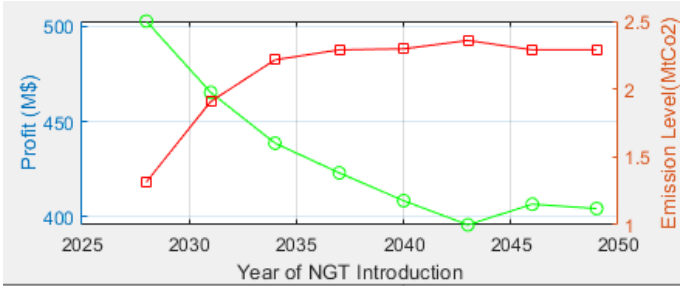


Figure 8. Impact of NGT year of introduction on profit and emission level

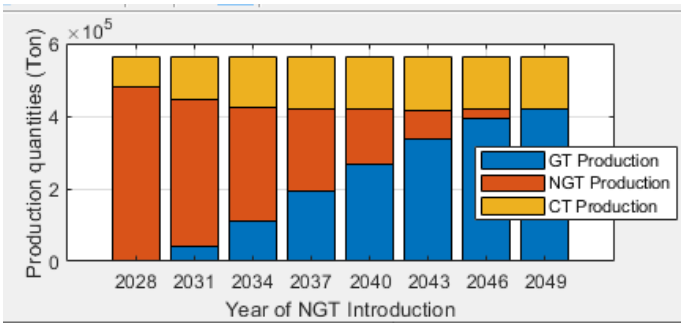


Figure 9. Impact of NGT year of introduction on production decisions

As shown in Figure 9, NGT production is highest when introduced early (e.g., 480,885.63 in 2028) but declines over time, eventually dropping to 0 by 2049.
This suggests that NGT, while initially impactful, may not be sustainable or cost-effective in the long run, leading the company to phase it out regardless of when it is introduced.
The results in figure 9 indicates that the company continues to rely on CT to some extent, even as it invests in GT and NGT. However, the reliance on CT decreases more significantly in scenarios where NGT is introduced earlier.
When the introduction of NGT occurs after 2040, there is a noticeable increase in investment in GT. This is because the return on investment in green technologies is realized over the long term. Consequently, when NGT is introduced late, companies increasingly choose to free up resources or create synergies that accelerate the adoption of GT, ensuring a more stable and predictable transition toward sustainability.

The earlier NGT is introduced, the greater its impact on profit maximization and emission reduction (Figure 8). This is driven by the earlier adoption of more cost-effective and efficient technologies, highlighting the critical role of research in advancing green technologies. To accelerate this transition, governments should invest in early-stage innovation and technological improvements, ensuring cost reductions and efficiency gains that drive sustainable energy adoption.
In most cases, the system continues to rely on conventional technology despite the availability of greener alternatives with lower production costs and zero emissions. The primary barrier to accelerating the green transition is the high investment cost associated with these technologies. Therefore, capital-constrained manufacturers must have greater access to funding through green loans and financial incentives to support their transition to sustainable production.

5 CONCLUSION

In this paper, we presented the interaction between strategic green investment decisions and tactical decisions under the cap-and-trade mechanism and green subsidies. We represent management problem as a multi-stage stochastic program, demand is represented as uncertainties. We obtain the optimal patterns of the using the stochastic dual dynamic programming algorithm applied to the mathematical model represented in a scenario tree. Our methodology is applied to a case study in the aluminium industry.

Our study presents several avenues for further exploration. The results can be compared with the equivalent deterministic problem to highlight the critical role of adaptability offered by SDDP. It would be valuable to integrate both allowance availability and price uncertainty throughout the entire planning horizon to enhance decision-making. Additionally, considering the substantial environmental impact of remanufacturing, particularly within the aluminum industry, a more detailed analysis of these effects on decision outcomes should be conducted in future research.

6 REFERENCES

An, J., He, G., Ge, S., & Wu, S. (2025). The impact of government green subsidies on corporate green innovation. Finance Research Letters, 71, 106378.

Avval, A. E., Dehghanian, F., & Pirayesh, M. (2023). Joint Optimization of Multiple Supply Chains Under Cap-And-Trade Regulation: A Bi-Level Programming Model and Solution Algorithm. Asia-Pacific Journal of Operational Research, 40(02), 2250019.

Chen, X., Zhang, Y., & Wang, L. (2024). Energy management and optimal storage sizing for a shared community: A multi-stage stochastic programming approach. Journal of Energy Management, 45(3), 112-126.

Dragomir, V. D., Dumitru, M., & Perevoznic, F. M. (2023). Carbon reduction and energy transition targets of the largest European companies: An empirical study based on institutional theory. Cleaner Production Letters, 4, 100039.

Drake, D. F., Kleindorfer, P. R., & Van Wassenhove, L. N. (2016). Technology choice and capacity portfolios under emissions regulation. Production and Operations Management, 25(6), 1006-1025.

ECCC (2020). Strategic Assessment of Climate Change. Environment and Climate Change Canada. Retrieved from https://publications.gc.ca/collections/collection_2021/eccc/En14-417-2020-eng.pdf (last access: 16 February 2025).

Fracchia, E., & Mus, C. (2024). LOW CARBON FOOTPRINT ALUMINIUM COMPONENTS FOR E-MOBILITY. *ACTA METALLURGICA SLOVACA*, *30*(1), 24-28.

Garcia-Alvarado, M., Paquet, M., & Chaabane, A. (2016). Joint strategic and tactical planning under the dynamics of a cap-and-trade scheme. IFAC-PapersOnLine, 49(12), 622-627.

Li, J., & Wang, S. (2024). Stochastic dual dynamic programming for optimal power flow problems under uncertainty. Operations Research Letters, 98(2), 67-80.

Lin, T., & Chen, P. (2023). Price timing and financing strategies for a capital-constrained supply chain with price-dependent stochastic demand. Journal of Supply Chain Management, 58(4), 233-245.

Liu, R., & Zhang, H. (2016). Generation expansion planning with large amounts of wind power via decision-dependent stochastic programming. IEEE Transactions on Power Systems, 31(5), 3776-3785.

Liu, X., Wang, Y., & Li, J. (2024). Multi-stage cooperative planning among shared energy storage operator and multiple prosumers in regional integrated energy system considering long-term uncertainty. Energy Systems Research, 12(1), 55-72.

Nicholson, S. R., Rorrer, N. A., Uekert, T., Avery, G., Carpenter, A. C., & Beckham, G. T. (2023). Manufacturing energy and greenhouse gas emissions associated with United States consumption of organic petrochemicals. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 11(6), 2198-2208.

Pereira, M. V., & Pinto, L. M. (1991). Multi-stage stochastic optimization applied to energy planning. Mathematical programming, 52, 359-375.

Shahin, V., Alimohammadlou, M., & Abbasi, A. (2024). Identifying and prioritizing the barriers to green innovation

in SMEs and the strategies to counteract the barriers: An interval-valued intuitionistic fuzzy approach. Technological Forecasting and Social Change, 204, 123408.

Shapiro, A. (2011). Analysis of stochastic dual dynamic programming method. European Journal of Operational Research, 209(1), 63-72.

Shen, A., & Zhang, J. (2024). Technologies for CO2 emission reduction and low-carbon development in primary aluminum industry in China: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 189, 113965.

Sun, M., Zhang, R., & Wang, L. (2022). Strategic production and responsible sourcing decisions under an emissions trading scheme. Journal of Environmental Economics, 74(2), 140-158.

Wang, C., Li, Z., & Chen, Y. (2024). Multi-stage planning of clean resources and energy storage assets with hybrid uncertainty modeling for low-carbon resilient distribution systems. Energy Planning Journal, 29(1), 90-105.

Wang, Q., Xiu Xu, S., Ji, X., & Zhao, N. (2024). Joint decisions on selling mode choice and emission reduction investment under cap-and-trade regulation. International Journal of Production Research, 62(18), 6753-6780.

Wang, S., & Li, J. (2024). Optimal fleet replacement management under cap-and-trade system with government subsidy uncertainty. Transportation Research Part B, 142, 212-225.

Yang, T., Zhang, Q., & Liu, H. (2022). Multi-stage stochastic optimization of carbon risk management. Journal of Environmental Risk Analysis, 58(3), 185-200.

Zhang, Q., Liu, H., & Chen, X. (2024). Multi-stage stochastic dual dynamic programming to low-carbon economic dispatch for power systems with flexible carbon capture and storage devices. IET Generation, Transmission & Distribution, 18(2), 89-101.

Zhang, T., Wang, C., & Liu, X. (2020). Effects of allowance allocation rules on green technology investment and product pricing under the cap-and-trade mechanism. Energy Policy, 136, 110934.

Zhou, J., Wang, L., & Liu, Y. (2016). Manufacturing/remanufacturing decisions for a capital-constrained manufacturer considering carbon emission cap and trade. Journal of Cleaner Production, 125, 312-324.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Vers un réseau de recyclage du plastique à faible émission de carbone : Une étude de cas au Québec

RIM LARBI[1], JULIEN TROCHU[1], BACEM KTARI[2], AMIN CHAABANE[1]

[1] ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE (ÉTS)
1100 RUE NOTRE DAME OUEST, QC H3C 1K3 MONTRÉAL, CANADA

[2] INSTITUT D'INNOVATION EN LOGISTIQUE DU QUÉBEC (INNOVLOG)
8300 RUE SAINT-PATRICK, LASALLE, QC H8N 1V1, MONTRÉAL, CANADA

[1] RIM.LARBI@ETSMTL.CA [1] JULIEN.TROCHU@ETSMTL.CA
[2] BACEMKTARI@GMAIL.COM [1] AMIN.CHAABANE@ETSMTL.CA

Résumé - La gestion des déchets plastiques rencontre plusieurs défis dus à la diversité des matériaux et de l'inefficacité du système de recyclage, entraînant de nombreux enfouissements et impacts environnementaux négatifs. L'optimisation du réseau logistique inverse pourrait améliorer la rentabilité et la durabilité de la filière. Actuellement dominé par le transport routier, le système limite l'adoption de solutions économiquement viables et à faible empreinte carbone. Par ailleurs, la recherche sur l'intégration du transport multimodal et des stratégies avancées de tri demeure insuffisante, alors que ces approches pourraient améliorer les performances économiques et environnementales. Cette étude évalue l'impact du transport multimodal et du tri avancé sur la chaîne logistique inverse des plastiques au Québec. Un modèle d'optimisation a été développé pour analyser différentes localisations d'installations de tri et options de transport. Plusieurs scénarios ont été comparés, opposant un système exclusivement routier à une approche multimodale (maritime et routier). Les résultats montrent que l'intégration du transport maritime réduit les coûts de 0,7 % et qu'un réacheminement de 1 % des déchets par mode maritime diminue les émissions de gaz à effet de serre de 5 %. Ces résultats confirment le potentiel des stratégies logistiques avancées pour rendre la filière plus efficace et durable.

***Mots clés* - Gestion des déchets plastiques, Logistique inverse, Programmation linéaire, Conception de réseau, Économie circulaire.**

Abstract – Plastic waste management faces significant challenges due to the diverse composition of plastics and inefficiencies in the recycling system, leading to high landfill rates and environmental concerns. Optimizing logistics within plastic recycling can enhance both cost efficiency and sustainability. However, current systems rely primarily on road transport, limiting the adoption of low-carbon and cost-effective logistics solutions. Despite its potential benefits, research on integrating multimodal transport and advanced sorting remains scarce. This study evaluates the impact of incorporating multimodal transport and advanced sorting in Quebec's plastic recycling supply chain, focusing on total costs and greenhouse gas (GHG) emissions. Using a case study approach, an optimized network design model was developed to assess different sorting facility locations and transport modes. Results show that integrating multimodal transport reduces total costs by 0.7%, while redirecting just 1% of plastic waste to inland waterways cuts GHG emissions by 5%. These findings underline the potential of strategic logistics improvements to enhance economic and environmental performance in plastic recycling networks.

***Key words:* Plastic waste management, Reverse logistics, Linear programming, Network design, Circular economy.**

1 INTRODUCTION

La gestion des déchets plastiques représente un défi mondial urgent, nécessitant des solutions durables. Le Canada génère 3,3 millions de tonnes de déchets plastiques par an, un chiffre qui pourrait tripler d'ici 2030. Ainsi, l'impératif de revoir les pratiques de recyclage du plastique est devenu une évidence (Canada, 2022). Malgré une sensibilisation accrue, le taux de recyclage reste faible (9 % en 2019), et la majorité des déchets est enfouie ou incinérée (Canada, 2022). Cette inefficacité accentue l'extraction des ressources fossiles et l'empreinte carbone du pays. Pour atteindre son objectif de zéro déchet plastique et zéro émission nette de gaz à effet de serre **(**GES) d'ici 2050**,** le Canada doit adopter des stratégies de gestion des déchets plus résilientes et durables.

Un tri efficace des déchets plastiques est essentiel pour lutter contre la pollution et améliorer la gestion durable des déchets. La nature hétérogène des déchets plastiques présente des défis importants, notamment des risques de contamination et une perte de valeur. Souvent, seuls les types les plus reconnaissables sont triés, ce qui laisse une grande quantité de déchets inutilisés. L'adoption de technologies de tri avancées pourrait améliorer l'efficacité, mais leur rentabilité dépend des

volumes à traiter et de l'efficacité du système de transport. Ce problème est particulièrement prononcé pour les déchets de plastiques en raison de leur faible densité ce qui rend les activités de transport moins rentables. De plus, l'intégration du transport multimodal dans la logistique inverse offre également une opportunité prometteuse pour améliorer la durabilité du recyclage des déchets plastiques. Bien que le transport routier domine, les voies navigables intérieures restent sous-utilisées malgré leur potentiel de réduction des coûts globaux et des émissions de GES.

Cette étude propose un cadre décisionnel multicritère pour optimiser le positionnement des installations de tri et la planification des itinéraires de transport. En intégrant des critères environnementaux, économiques et logistiques, elle vise à renforcer la résilience et la durabilité des chaînes logistiques inverses. L'objectif principal est de développer un cadre d'aide à la décision optimisant le réseau de recyclage des plastiques au Québec par une intégration stratégique du transport multimodal et des infrastructures de tri. En explorant diverses stratégies de transport, incluant les voies navigables et le transport routier, cette étude cherche à accroître l'efficacité, réduire les impacts environnementaux et limiter les coûts de gestion des déchets plastiques. Fondée sur une étude de cas, elle s'articule autour des questions de recherche suivantes:

• *Comment restructurer et optimiser le réseau de logistique inverse des déchets plastiques au Québec pour améliorer la performance en matière de durabilité et soutenir l'objectif de zéro déchet plastique d'ici 2050 ?*

• *Quels sont les avantages économiques et environnementaux de l'intégration d'options de transport multimodal par les voies navigables dans les réseaux logistiques de déchets plastiques?*

En répondant à ces questions, cette étude apporte une contribution à la recherche académique et à la pratique industrielle en démontrant comment les modèles d'optimisation, les stratégies de transport multimodal et les technologies de tri avancées peuvent améliorer la durabilité économique et environnementale des réseaux logistiques inverse des plastiques. Elle constitue également une référence pratique pour l'élaboration de politiques de gestion des déchets et la conception de chaînes d'approvisionnement durables.

Le reste de ce papier est organisé comme suit. La section 2 analyse les études antérieures pertinentes en lien avec la gestion des déchets plastiques, le transport multimodal des flux de déchets et les problèmes de sélection des technologies dans le domaine de la logistique inverse. La section 3 décrit la méthodologie de recherche et le processus de collecte des données. La section 4 détaille la formulation du modèle mathématique, y compris les hypothèses et les contraintes associées. La section 5 présente une étude de cas sur les flux de déchets plastiques au Québec, suivie d'une discussion approfondie des résultats. Enfin, les sections 6 et 7 proposent des recommandations clés et concluent l'étude, en soulignant les implications pour la politique gouvernementale et la pratique quotidienne dans le domaine de la gestion des déchets plastiques.

2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 Problèmes ciblant les déchets de matières plastiques

Peu de modèles de conception de réseau logistique inverse (CRLI) récents se sont concentrés spécifiquement sur le recyclage des matières plastiques. (Stallkamp et al., 2022) ont mené une étude de cas sur les déchets d'emballages plastiques en Europe et ont évalué les compromis entre les coûts du réseau et diverses mesures environnementales. (Aviso et al., 2023) ont conçu un modèle de programmation linéaire en nombres entiers mixtes (MILP) pour affecter les sources de déchets plastiques avec les usines de recyclage en fonction de leur capacité à tolérer les contaminants. Deux études de cas démontrent l'efficacité du modèle et l'impact de la politique étudiée sur l'atténuation de la pollution plastique. Enfin, un problème de CRLI de bouteilles en plastique a été étudié par (Tosarkani et al., 2024), intégrant les trois aspects de la durabilité: économique, environnementale et sociale. Un cadre d'optimisation a été développé pour prendre en compte les caractéristiques de chevauchement et de multi-classement des échantillons de données historiques. Les résultats d'une étude de cas réelle dans la région de Vancouver ont révélé que la configuration optimale du réseau de recyclage est sensible aux fluctuations des coûts et des demandes.

2.2 Transport multimodal des flux de déchets

L'adoption de solutions de transport multimodales a été reconnue comme axe prometteur d'évolution vers des chaînes d'approvisionnement durables pouvant améliorer la rentabilité des opérations et réduire les impacts environnementaux. En particulier, cette dernière décennie, on note un intérêt croissant pour les solutions multimodales au sein des réseaux de logistique inverse (Inghels et al., 2016). (Van Engeland et al., 2020) ont présenté un modèle de conception de réseau de transport multimodal des déchets solides municipaux en Flandre (Belgique). Le modèle intègre les mesures économiques et environnementales en optimisant le choix du mode de transport et la fréquence des livraisons. Les résultats montrent que la combinaison du transport routier et du transport fluvial peut concurrencer le transport purement routier au moyen de convois de barges. En outre, (Sun et al., 2019) ont exploré le problème de l'acheminement des matières dangereuses en considérant un réseau ferroviaire multimodal dans lequel l'exposition de la population et la quantité associée de matières dangereuses représentent un risque. Les résultats suggèrent qu'il est possible de faire des compromis entre deux objectifs conflictuels et que le seuil d'émission de carbone a un impact significatif sur les décisions optimales d'acheminement des matières dangereuses.

Plus récemment, (Huang & Zhao, 2022) ont développé un MILP basé sur une approche multimodale (ferroviaire et routière) pour le transport des déchets dangereux en Chine, en se concentrant sur la minimisation des coûts de transport. L'étude de cas portant sur plusieurs villes met en évidence la nécessité d'augmenter les opportunités de transfert et les coûts fixes pour atteindre un niveau acceptable d'exposition au risque lié aux matières dangereuses. Récemment, (Ai et al., 2023) ont utilisé une approche innovante basée sur les données, proposant un modèle multi-objectif prenant en compte le transport routier et fluvial pour le vrac sec, minimisant ainsi le temps de transport et les coûts associés au gaspillage. Enfin, (Zhu et al., 2024) présentent un modèle d'optimisation multi-objectif pour le transport multimodal écologique, axé sur la consolidation des commandes et la minimisation des coûts et des émissions de carbone. Ce modèle intègre le transport aérien et le transport ferroviaire à grande vitesse. L'étude de cas montre que la

consolidation des commandes peut réduire de manière significative les coûts de transport et les émissions de GES.

2.3 Choix de la technologie dans les problèmes de CRLI

Le choix des technologies dans la CRLI est essentiel pour améliorer l'efficacité, la durabilité et la viabilité économique. (Kannan et al., 2023) présentent un modèle de programmation mixte multi-objectifs des déchets électroniques. Le modèle proposé prend en compte un ensemble de technologies vertes potentielles pour l'inspection, le démontage, la réparation/remise à neuf et le recyclage afin de maximiser le potentiel de revalorisation des produits, des composants et des matériaux. Les résultats sont validés par une étude de cas en Inde et démontrent que des technologies plus écologiques peuvent augmenter de manière significative le rendement global.

Les expériences mettent également en évidence des réductions significatives des émissions dans le cadre d'une politique de taxe sur le carbone. (Fan et al., 2023) étudient un problème de CRLI durable en tenant compte de plusieurs types de batteries de véhicules électriques usagées avec plusieurs technologies de recyclage potentielles. Les résultats expérimentaux démontrent qu'une légère augmentation du coût initial de conception du réseau peut réduire considérablement les émissions de carbone. (He et al., 2024) évaluent un autre modèle MILP multi-objectif pour optimiser le CRLI pour les batteries usagées en l'appliquant dans une étude de cas à Nanjing, en Chine. Différents niveaux technologiques ont été pris en compte pour diverses installations de traitement. Les résultats soulignent que des configurations de processus optimaux réduisent les coûts opérationnels du recyclage et diminuent les émissions totales.

2.4 Lacunes de la littérature scientifique

Malgré l'importance des décisions liées à la sélection des technologies, à leur emplacement et au transport multimodal dans l'optimisation de la logistique inverse, aucune étude n'a jusqu'à présent analysé ces aspects de manière conjointe pour améliorer les réseaux de recyclage des déchets plastiques. Cette recherche comble cette lacune en apportant une contribution significative à la littérature. Le modèle développé constitue un outil d'aide à la décision pour les décideurs politiques, les acteurs industriels et les gestionnaires de la chaîne d'approvisionnement, en leur permettant de concevoir des systèmes de gestion des déchets plus durables et économiquement viables. Fondé sur une étude de cas réelle, il démontre empiriquement que l'intégration de ces leviers améliore à la fois la rentabilité et la performance environnementale des réseaux logistiques. Enfin, cette recherche enrichit la compréhension de la logistique inverse durable et met en évidence l'importance des stratégies combinées de tri et de transport.

3 APPROCHE DE RECHERCHE ET DESCRIPTION DU CAS D'ÉTUDE

3.1 Approche méthodologique

Ce travail de recherche utilise une étude de cas comme point central de la méthodologie. Le but étant de déterminer comment l'intégration du transport multimodal et des stratégies de tri avancées dans la chaîne d'approvisionnement du recyclage du plastique réduira les coûts totaux et les émissions de gaz à effet de serre par rapport au système existant. Le choix d'une étude de cas est justifié par la nature complexe et contextuelle des chaînes d'approvisionnement pour le recyclage durable des matières plastiques. L'approche de l'étude de cas permet une exploration approfondie de l'applicabilité dans le monde réel du modèle de conception de réseau optimal proposé, en incorporant des contraintes pratiques telles que les facteurs géographiques, les infrastructures existantes, les cadres politiques et les considérations environnementales. En employant une méthodologie par étude de cas, on s'assure que le modèle de conception de réseau proposé est testé dans des conditions réelles, offrant ainsi des informations exploitables pour améliorer la gestion durable des déchets plastiques. Cette approche comble le fossé entre la modélisation théorique et la mise en œuvre pratique, en fournissant une base solide pour faire progresser la logistique inverse et les solutions de transport écologiques**.** Comme illustré dans la figure 1**,** cette étude a suivi les cinq étapes clés de la méthodologie par étude de cas: définition de l'objectif, développement des instruments,

collecte des données, analyse et diffusion (Stuart et al., 2002).

Figure 1 : La méthode de recherche en cinq étapes

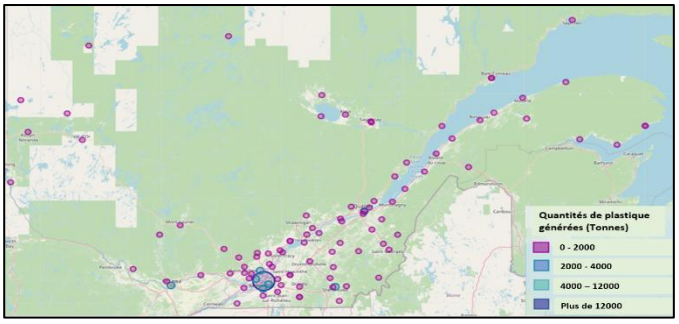
3.2 Description du cas d'étude: La chaîne logistique de recyclage des plastiques au Québec

Cette recherche examine le réseau de logistique inverse des déchets plastiques ménagers au Québec, Canada. Le recyclage repose sur une collecte sélective à plusieurs bacs, permettant de séparer les plastiques des autres matières recyclables dans des installations de tri. Contrairement aux plastiques industriels, qui empruntent des filières distinctes, les déchets plastiques ménagers suivent un réseau structuré en quatre étapes : production des déchets, tri, recyclage ou revalorisation, et enfin élimination (décharge ou incinération). Les autorités locales gèrent la collecte des déchets via un système à bacs multiples, où les ménages trient leurs déchets en trois catégories : organiques, généraux et recyclables. Ces derniers, incluant le plastique, le verre, le papier et le métal, sont acheminés vers des centres de tri. Toutefois, cette étude ne modélise pas les tournées de collecte municipales.

Dans les centres de tri, les plastiques sont séparés des autres matériaux recyclables. Les plastiques à forte valeur ajoutée, comme le PET (type 1) et le PEHD (type 2), sont mis en ballots individuels et revendus à prix élevé, tandis que les autres sont généralement regroupés en ballots mixtes (#1-7 ou #3-7). Le tri des plastiques de moindre valeur dépend de la demande du marché, car il est coûteux et parfois non rentable. Après triage, les plastiques sont envoyés vers des usines spécialisées dans le recyclage de types spécifiques ou de ballots mixtes. Les plastiques non recyclables, exclus en raison d'inefficacités du tri, finissent en décharge ou sont incinérés. Ces pertes sont dues à la contamination, aux variations de composition chimique et aux points de fusion incompatibles, réduisant ainsi la qualité et le potentiel de réutilisation des matériaux recyclés.

Au Québec, le transport routier est le seul mode utilisé pour acheminer les déchets recyclables des sites de collecte aux centres de tri, puis aux recycleurs. Les plastiques de type 1 et 2 (PET et PEHD) sont directement envoyés aux recycleurs, tandis que les autres sont transformés, exportés, incinérés ou mis en décharge (Figure 2). Cette étude soutient les initiatives

d'économie circulaire du Québec en intégrant les zones industrialo-portuaires (ZIP) et en explorant le potentiel du transport multimodal. Son objectif principal est d'améliorer la récupération des déchets plastiques en optimisant le tri et en



ajoutant de nouvelles lignes de tri. Le passage d'un transport exclusivement routier à un système multimodal incluant les voies navigables intérieures pourrait réduire les émissions de GES et limiter l'impact environnemental de la gestion des déchets plastiques.

Figure 2 : Le réseau de récupération des matières plastiques au Québec

L'optimisation du tri et le choix de modes de transport durables sont essentiels pour renforcer l'éco-efficacité du recyclage au Québec. Cela nécessite des investissements dans des équipements de tri avancés et une transition vers le transport fluvial, en accord avec les principes de l'économie circulaire et les stratégies de durabilité du Québec et du Canada. En collaboration avec des partenaires industriels, cette étude identifie les emplacements optimaux pour de nouvelles lignes de tri et évalue la faisabilité de l'intégration des voies navigables au réseau logistique du recyclage.

Une approche de tri en deux phases est proposée. La première Le tri des déchets plastiques s'effectue en deux phases. Le tri primaire, réalisé dans les centres de tri, classe les déchets ménagers par matériau (plastique, papier, verre, métal). Certains centres extraient manuellement les plastiques de grande valeur, comme le PET et le PEHD, pour un traitement séparé en raison de leur forte demande.

Le tri secondaire, ou surtri, est effectué dans des installations spécialisées équipées de systèmes automatisés permettant une classification plus précise des plastiques mélangés, améliorant ainsi l'efficacité et les taux de récupération. Dans le cadre de l'intégration de la logistique maritime, les zones industrialo-portuaires (ZIP) ont été envisagées comme sites potentiels pour ces centres spécialisés. Trois configurations ont été étudiées : (1) intégrer le surtri aux centres de tri existants, (2) l'implanter chez les recycleurs de plastique, ou (3) créer de nouveaux centres spécialisés dans les ZIP. L'étude privilégie l'option d'intégrer le surtri aux recycleurs existants, s'étant révélée la plus efficace.

Une approche par scénarios a été utilisée pour évaluer l'impact des changements sur le réseau. Le scénario 0 représente le système actuel et sert de référence. Le scénario 1 introduit des lignes potentielles de surtri chez les recycleurs existants. Le scénario 2 intègre en plus le transport multimodal avec le transport fluvial. Le scénario 3 étend le scénario 2 en considérant les coûts externes et des critères de durabilité. Tous les scénarios ont été modélisés à l'aide de la programmation linéaire en nombres entiers mixtes (MILP) pour minimiser le coût total du réseau. Le modèle a été implémenté avec Python et nous avons utilisé le solveur Gurobi pour résoudre l'ensemble des scénarios.

4 MODÈLE MATHÉMATIQUE

La section suivante présente les hypothèses et la formulation du modèle MILP pour le scénario de base (scénario 0).

4.1 Hypothèses du modèle

Les hypothèses utilisées dans le scénario de base sont les suivantes : le tri manuel a été effectué pour les types de plastique 1 et 2 ; ainsi, les ballots de plastique mixtes (#1-7) ont été triés en ballots de plastique mélangé (#3-7), tandis que les types de plastique 1 et 2 ont été extraits. Les connexions entre les municipalités et les centres de tri ont été optimisées, en tenant compte de la quantité reçue par chaque centre de tri. Cette optimisation considère des coûts de traitement identiques pour tous les centres de tri et la quantité actuelle reçue par chaque centre. La proportion de plastique traitée en centre de tri a été basée sur le plus récent rapport de caractérisation (RECYC-QUÉBEC & Éco Entreprises Québec, 2015-2018) concernant la quantité totale de plastique traitée dans les centres de tri.

L'afflux de quantités vers les centres de tri, à l'exception de celles envoyées pour être recyclées, est considéré comme un volume destiné à l'enfouissement. L'équilibre des quantités envoyées en enfouissement a été calculé comme l'afflux moins les quantités vendues pour le recyclage. Les coûts du tri manuel sont identiques pour tous les centres de tri ; cela s'applique également aux coûts d'enfouissement.

Les connexions entre les centres de tri et les recycleurs/usines de traitement ont été optimisées au niveau du réseau, en tenant compte de la demande de chaque recycleur/usine de traitement. Les activités de collecte au sein des municipalités n'ont pas été prises en compte. Seuls les coûts de transport entre chaque municipalité et les centres de tri ont été modélisés. Seul le transport routier a été pris en compte dans le scénario de référence.

4.2 Ensembles et paramètres

$c \in C$ Ensemble des municipalités (nœuds de collecte)
$s \in S$ Ensemble des centres de tri
$r \in R$ Ensemble des recycleurs / reconditionneurs
$l \in L$ Ensemble des décharges
$k \in K$ Ensemble des nœuds de transfert multimodal (ZIP)
$m \in M$ Ensemble des différents types de plastique
$m \in M1$ Ensemble des types de plastique après le tri primaire (m=1, 2 et ballots de plastiques mixtes de type (#3-7))
$N = C \cup K \cup S \cup R$
P_c Quantité de plastiques mixtes collectés par la municipalité $c \in C$
$\square_m$ Fraction de plastique de type $m \in M$ dans les ballots de plastique mixtes de type (#1-7)
γ_m Fraction de plastique de type $m \in M$ dans les ballots de plastique mixtes de type (#3-7)
Cap_s Capacité du centre de tri $s \in S$
Cap_{SS1} Capacité de 3 lignes de tri automatisées pour trier les ballots de plastiques de type (#1-7)
Cap_{SS2} Capacité de 2 lignes de tri automatisées pour trier les ballots de plastiques de type (#3-7)

α Taux de contamination : proportion de plastique entrant dans un centre de tri qui ne peut pas être recyclé et doit être envoyé à la décharge.

D_r^m Demande du type de plastique $m \in M$ par recycleur $r \in R$

D_r^{17} Demande pour les ballots de plastique mixtes de type (#1-7) par le recycleur $r \in R$

D_r^{37} Demande pour les ballots de plastique mixtes de type (#3-7) par le recycleur $r \in R$

SC_1 Coût unitaire du tri manuel par tonne de plastique lors du tri primaire dans un centre de tri

SC_2 Coût unitaire du tri secondaire par tonne de plastique

SC_{inv} Coût d'investissement pour une ligne de surtri

LC Coût unitaire de mise en décharge par tonne métrique de plastique

cr_{ij} Coût unitaire du transport routier par tonne de plastique entre les nœuds $i, j \in N$

$cm_{kk'}$ Coût unitaire du transport maritime par tonne de plastique entre les nœuds de transfert multimodaux $k \in K$ et $k' \in K$

4.3 Variables de décision

Flux de transport

X_{ij}^{17} Quantité de ballots de plastique mixtes de type (#1-7) transportés entre les nœuds $i, j \in N$

X_{ij}^{37} Quantité de ballots de plastique mixtes de type (#3-7) transportés entre les nœuds $i, j \in N$

X_{ij}^{m} Quantité de plastique de type $m \in M$ transportée entre les nœuds $i, j \in N$

Q_{ij} Quantité totale transportée entre les nœuds $i, j \in N$

Tri primaire

Y_s Variable binaire, égale à 1 si le tri manuel des plastiques est effectué au centre de tri $s \in S$; 0 sinon

Q_{ms}^{PS} Quantité de plastique $m \in M1$ passant au tri manuel au centre de tri $s \in S$

Tri secondaire (Surtri)

Y_r^{17} Variable binaire égale à 1 si le surtri des ballots de plastique mixtes (#1-7) est effectué chez le recycleur $r \in R$; 0 sinon

Y_r^{37} Variable binaire égale à 1 si le surtri des ballots de plastique mixtes (#3-7) est effectué chez le recycleur $r \in R$; 0 sinon

Q_{mr}^{SS1} Quantité de plastique de type $m \in M$ triée lors du surtri des ballots de plastique mélangés (#1-7) par le recycleur $r \in R$

Q_{mr}^{SS2} Quantité de plastique de type $m \in M$ triée lors du surtri des ballots de plastique mélangés (#3-7) par le recycleur $r \in R$

Q_{mr}^{SS} Quantité de plastique de type $m \in M$ triée lors d'un surtri chez le recycleur $r \in R$

4.4 Fonction-objectif

L'objectif du modèle (1) est de minimiser les coûts de transport (2) ainsi que les coûts de tri des plastiques (3), ce qui inclut les coûts de tri manuel (tri primaire) et les coûts de surtri (tri secondaire) ainsi que les coûts de mise en décharge (4).

$$Z = Min\ (C^{TR} + C^{SORT} + C^{L}) \quad (1)$$

Avec :

$$C^{TR} = \sum_i \sum_j Q_{ij} * Cr_{ij} + \sum_{i \epsilon K} \sum_{j \epsilon K} Q_{ij} * Cm_{ij} \quad (2)$$

$$C^{SORT} = \sum_{s \in S} \sum_m Q_{ms}^{PS} * SC_1 + \sum_{r \epsilon R} \sum_m Q_{mr}^{SS} * SC_2 + \sum_{r \epsilon R} (3Y_{17r} + 2Y_{37r}) * SC_{inv} \quad (3)$$

$$C^{L} = \sum_{i \epsilon (S \cup R)} \sum_{j \in L} Q_{ij} * LC \quad (4)$$

4.5 Contraintes

$$Q_{ij} = X_{ij}^{17} + X_{ij}^{37} + \sum_m X_{ij}^{m} \qquad \forall i, j \in N \quad (5)$$

$$\sum_{j \in (C \cup K)} Q_{js} = \sum_{j \in N \setminus C} Q_{sj} \qquad \forall s \in S \quad (6)$$

$$\sum_{j \in N} Q_{jk} = \sum_{j \in N} Q_{kj} \qquad \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{j \in (S \cup K)} Q_{cj} = P_c \qquad \forall c \in C \quad (8)$$

$$\sum_j Q_{js} \leq Cap_s \qquad \forall s \in S \quad (9)$$

$$\sum_{j \in L} Q_{sj} = \alpha * \sum_{j \in N} Q_{js} \qquad \forall s \in S \quad (10)$$

Tri primaire (manuel)

$$\sum_j X_{sj}^{m} \leq \beta_m * \sum_j X_{js}^{17} \qquad \forall s \in S, \forall m \in M1 \quad (11)$$

$$\sum_j X_{sj}^{m} \geq \beta_m * \sum_j X_{js}^{17} - M(1 - Y_s) \qquad \forall s \in S, \forall m \in M1 \quad (12)$$

$$\sum_j X_{sj}^{m} \leq M Y_s \qquad \forall s \in S, \forall m \in M1 \quad (13)$$

$$\sum_j X_{sj}^{17} \leq M(1 - Y_s) \qquad \forall s \in S \quad (14)$$

$$Q_{ms}^{PS} = \sum_j X_{sj}^{m} \qquad \forall s \in S, \forall m \in M1 \quad (15)$$

Tri secondaire de ballots de plastique mixtes (#1-7)

$$Q_{mr}^{SS1} \leq \beta_m * \sum_i X_{ir}^{17} \qquad \forall m \in M, \forall r \in R \quad (16)$$

$$Q_{mr}^{SS1} \geq \beta_m * \sum_i X_{ir}^{17} - M(1 - Y_r^{17}) \qquad \forall m \in M, \forall r \in R \quad (17)$$

$$Q_{mr}^{SS1} \leq M\ Y_r^{17} \qquad \forall m \in M, \forall r \in R \quad (18)$$

$$Q_{mr}^{SS1} \leq Cap_{SS1}\ Y_r^{17} \qquad \forall m \in M, \forall r \in R \quad (19)$$

Tri secondaire de ballots de plastique mixtes (#3-7)

$$Q_{mr}^{SS2} \leq \gamma_m * \sum_i X_{ir}^{37} \qquad \forall m \in M,\ m > 2, \forall r \in R \quad (20)$$

$$Q_{mr}^{SS2} \geq \gamma_m * \sum_i X_{ir}^{37} - M(1 - Y_r^{37}) \qquad \forall m > 2, \forall r \in R \quad (21)$$

$$Q_{mr}^{SS2} \leq M\ Y_r^{37} \qquad \forall m \in M, m > 2, \forall r \in R \quad (22)$$

$$Q_{mr}^{SS2} \leq Cap_{SS2}\ Y_r^{37} \qquad \forall m \in M, \forall r \in R \quad (23)$$

$$Q_{mr}^{SS} = Q_{mr}^{SS1} + Q_{mr}^{SS2} \qquad \forall m \in M, r \in R \quad (24)$$

Satisfaction de la demande des recycleurs/reconditionneurs

$$\sum_i X_{ir}^{17} \geq D_r^{17} \qquad \forall r \in R \quad (25)$$

$$\sum_i X_{ir}^{37} \geq D_r^{37} \qquad \forall r \in R \quad (26)$$

$$\sum_i X_{ir}^{m} + Q_{mr}^{SS} \geq D_{mr} \qquad \forall r \in R \quad (27)$$

Contraintes de non-négativité et de binarité des variables

$$X_{ij}^{17}, X_{ij}^{37}, X_{ij}^{m}, Q_{ij}, Q_{mr}^{SS1}, Q_{mr}^{SS2}, Q_{mr}^{SS} \geq 0 \quad (28)$$

$$Y_r^{17}, Y_r^{37}, Y_s \in \{0,1\} \quad (29)$$

Les contraintes de conservation des flux garantissent que les flux d'entrée et de sortie sont équilibrés aux différents nœuds du réseau. Les contraintes de capacité imposent les limites opérationnelles des centres de tri et des installations de tri secondaire. Les contraintes de tri primaire définissent la faisabilité du tri manuel dans les centres de tri. Les contraintes de tri secondaire régissent le traitement des différents ballots de plastique dans les centres de recyclage. Les contraintes de satisfaction de la demande garantissent que les installations de recyclage reçoivent les quantités de matériaux requises. Les contraintes de non-négativité et binaires garantissent des valeurs valides pour les variables de décision.

5 Mise en œuvre de l'étude de cas au Québec

5.1 Collecte des données

Municipalités (population, quantité de déchets plastiques et localisation). Le Québec compte 81 municipalités régionales de comté (MRC) dont la population varie considérablement, selon l'*Institut de la Statistique du Québec*. La quantité de déchets plastiques générée a été estimée à l'aide des données de 2018 de *RECYC-QUÉBEC*, et basée sur les derniers registres de collecte de déchets disponibles (RECYC-QUÉBEC, 2018).

Centres de tri [fonction, localisation, capacité, quantité reçue]. Les données de *RECYC-QUÉBEC* fournissent les emplacements, le fonctionnement et les quantités de déchets reçus dans 27 centres de tri. Les quantités estimées en entrée et en sortie pour le recyclage et la valorisation ont été déterminées sur la base de données historiques. Le coût du tri manuel pour le tri primaire aux centres de tri est de 300 $/tonne (Québec, 2016).

Recycleurs/reconditionneurs [localisation, type de plastique accepté, demande]. Les informations sur les localisations, les types de plastique acceptés et les capacités de traitement de 20 recycleurs au Québec ont été obtenues auprès de *RECYC-QUÉBEC*. Certaines études ainsi que de précédentes expériences industrielles indiquent que l'installation de lignes de surtri automatisées peut réduire les coûts de main-d'œuvre de 25 %. Ces coûts représentent 44 % des coûts totaux de traitement (Services, 2000). Par conséquent, le coût du tri secondaire a été estimé à 234 $/tonne.

Transport routier [coût et distance]. Les coûts de transport ont été basés sur les tarifs contractuels pour le transport de matériaux en vrac, établis par le ministère des Transports du Québec**.** Les taux appliqués aux véhicules à 3 essieux et à 4 essieux sont les suivants :

- 1 639 $/tonne-km pour les distances allant jusqu'à 0,9 km,
- 0,327 $/tonne-km pour les distances entre 1 et 9 km,
- 0,297 $/tonne-km pour les distances entre 10 et 29,9 km,
- 0,123 $/tonne-km pour les distances entre 30 et 64,9 km,
- 0,097 $/tonne-km pour les distances entre 65 et 159,9 km.

Transport maritime [coût et distance]. Le Québec compte 15 zones industrialo-portuaires (ZIP) le long du fleuve Saint-Laurent. Le ministère des Transports du Québec tient à jour des données sur les distances entre les ZIP (Québec, 1998). Le coût moyen par tonne-km pour le transport maritime a été déterminé à partir de données historiques sur les coûts ainsi que d'entretiens avec des opérateurs maritimes actifs au Québec.

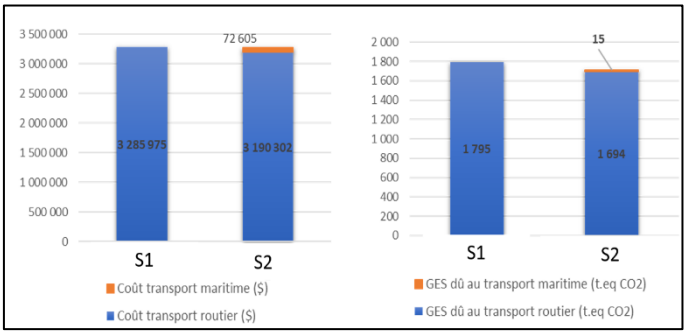
Coûts externes du transport. Les coûts totaux du transport comprennent à la fois les coûts purement économiques, mais aussi les coûts externes (sociaux). Les coûts externes, qui ne sont pas directement pris en compte dans la tarification des transports, incluent les accidents, la congestion, la dégradation des routes et la pollution. Ces derniers ont été estimés par l'Union des Municipalités du Québec, tandis que les coûts externes du transport maritime proviennent d'une étude de l'Union européenne (Commission et al., 2020).

Tableau 1 : Coûts externes

	Route ($ - cent / t.km)	Maritime ($ - cent / t.km)
Accidents	2,588	0.153
Congestion	1,432	N/A
Dégâts routiers	0.44	N/A
Pollution	1.433	1,974

Technologies de tri optique. Les consultations avec les fournisseurs de technologies de tri ont permis de déterminer qu'un système automatisé comportant deux lignes de tri équipées de trois trieurs optiques pouvait traiter efficacement 5 tonnes par heure. Fonctionnant pendant les trois quarts d'une équipe de 7 heures, six jours par semaine, ce système a la capacité de trier environ 60 000 tonnes de plastique mixtes par an. Chaque trieur optique est conçu pour traiter deux types de plastique. Comme les recycleurs se spécialisent dans le traitement de types de plastique ou de ballots spécifiques (types #1-7 ainsi que #3-7), les configurations des trieurs peuvent être ajustées en conséquence. Les ballots mixtes #1-7 nécessitent trois trieuses, tandis que les ballots #3-7 en nécessitent seulement deux. Notamment, le plastique de type 7, classé dans la catégorie "Autres", est généralement exclu du recyclage standard en raison de sa composition hétérogène et de sa recyclabilité limitée.

Figure 5 : Coûts externes - Comparaison des scénarios



5.2 Résultats de la nouvelle stratégie de tri (scénario 1)

Le scénario 1 intègre la nouvelle stratégie de tri du plastique, en introduisant des lignes de tri chez les recycleurs de plastique existants. Sans tri secondaire, la quantité estimée transportée vers les recycleurs et conditionneurs basés au Québec est d'environ 39 000 tonnes. En définissant le taux de récupération comme le rapport entre les quantités entrantes dans les centres de tri et celles envoyées au recyclage, ce taux a augmenté de

Figure 4: Scénario 1 vs Scénario 2

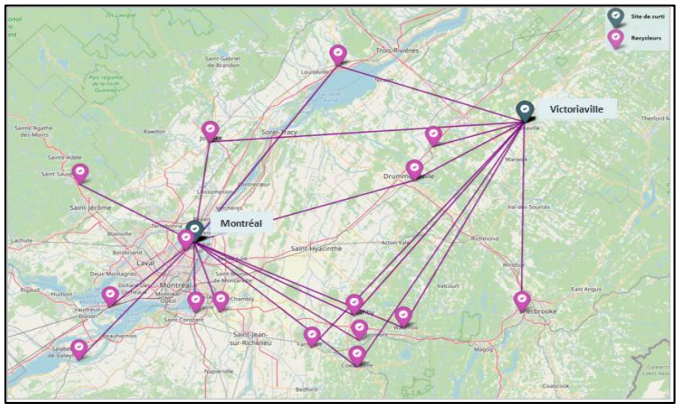


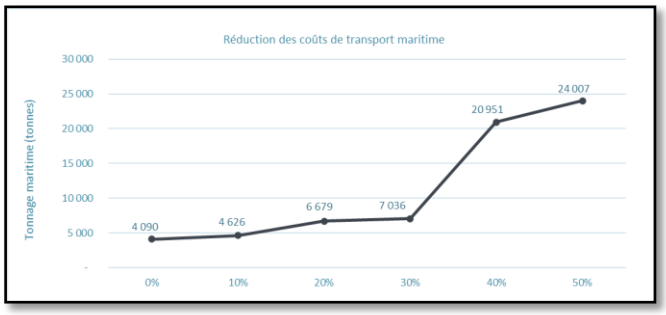
Figure 3 : Emplacement du tri secondaire (surtri)

manière significative, passant de 39 % à 89 %. Ainsi, 63 % de déchets plastiques résiduels en plus, soit l'équivalent de 68 000 tonnes, sont traités au lieu d'être acheminés vers des sites d'enfouissement. Cependant, ce traitement supplémentaire augmente les coûts logistiques liés au tri et au transport. Ces coûts ont été intégrés dans le modèle pour tous les scénarios où le tri secondaire est mis en œuvre.

Dans le cadre de la nouvelle stratégie de tri, deux lignes de tri secondaire automatisées, d'une capacité annuelle combinée de 60 000 tonnes, ont été proposées pour être installées chez des recycleurs et conditionneurs spécifiques. Dans ce cas précis, les emplacements optimaux pour ces lignes sont les recycleurs et les conditionneurs situés à Montréal et à Victoriaville, comme l'illustre la Figure 3.

5.3 Opportunités de transport multimodal (scénario 2)

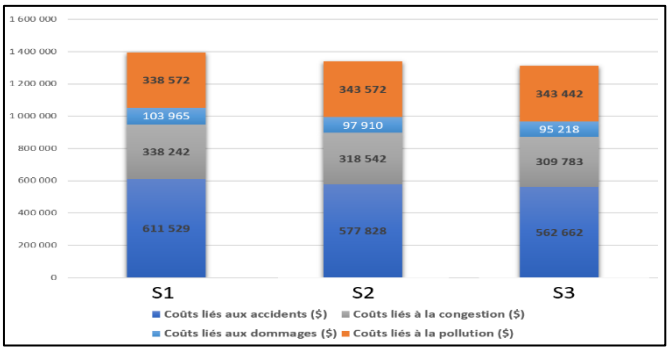
Le scénario 2 s'appuie sur le scénario 1 en incorporant des options de transport multimodal au sein du réseau logistique, en



particulier le transport fluvial. Pour évaluer les avantages que le transport multimodal peut apporter, une analyse comparative a été menée entre une configuration qui repose entièrement sur le transport routier (scénario 1) et une seconde qui utilise le transport multimodal (scénario 2). La comparaison a révélé que la mise en œuvre d'une stratégie de transport multimodale n'entraîne que des économies marginales, avec une réduction de 0,7 % des coûts. Notamment, seule une petite partie du transport total - plus précisément 4 090 tonnes - est effectuée par voie maritime. Cependant, il est important de souligner que même avec seulement 1 % de la quantité totale transportée par voie maritime, les émissions de gaz à effet de serre (GES) sont réduites de 5 % (voir Figure 4 ci-dessous).

5.4 Inclusion des coûts sociaux externes (scénario 3)

L'intégration des coûts de transport externe dans la fonction objectif du modèle renforce la performance environnementale



du réseau (S3). Les émissions de GES ont diminué de 7 % par rapport au scénario S1 et de 5 % par rapport au scénario S2. Cette réduction est due à l'augmentation de l'utilisation du mode maritime, les quantités transportées ayant augmenté de 63 % par rapport au scénario S2. En outre, la prise en compte des coûts externes dans un contexte multimodal, même pour de faibles quantités (au maximum 6 683 tonnes), a permis de réduire les coûts externes de 4 %. Plus significativement, pour S3, qui intègre ces coûts dans la fonction objectif du modèle, cette réduction atteint environ 6%. La ventilation des coûts externes est présentée dans la Figure 5.

Figure 5 : Coûts externes – Comparaison des scénarios

5.5 Analyses de sensibilité

L'objectif de cette analyse est de déterminer la structure des coûts du transport maritime qui soutiendrait le mieux la mise en œuvre d'un système de transport multimodal pour la chaîne d'approvisionnement en matières plastiques. Le but est d'identifier les mesures, telles que les politiques réglementaires ou les stratégies de tarification, qui devraient être adoptées par les autorités publiques pour inciter l'utilisation des transports et optimiser les combinaisons multimodales.

Pour évaluer l'effet des ajustements des coûts de transport, des réductions de 10 %, 20 %, 30 %, 40 % et 50 % ont été appliquées. Les résultats montrent un impact significatif, à savoir une réduction des coûts de 40 % entraînant une multiplication par quatre de la quantité transportée par le mode maritime (i.e. de 4 090 tonnes à plus de 20 000 tonnes). Cela met en évidence le rôle crucial de la structure tarifaire des coûts de transport dans la détermination de la viabilité de la logistique fluviale (Figure 6). Bien que les volumes transportés par le mode maritime restent relativement faibles, la subvention des

Figure 6 : Impact de la structure tarifaire sur les quantités transportées par voie maritime

coûts de transport pourrait être une approche viable pour promouvoir ce mode. D'après les données, le seuil auquel la quantité transportée par le mode maritime augmente fortement se situe à un niveau de réduction des coûts d'environ 40 % à 50 %. Ce seuil pourrait être encore réduit si les volumes de déchets générés devenaient plus élevés que ceux considérés dans les scénarios analysés. L'augmentation des volumes de transport par le mode maritime a également un impact notable sur l'environnement. Comme le montre la Figure 7, une réduction de 50 % des coûts de transport, combiné à une augmentation des flux maritimes, se traduit par une réduction des émissions de gaz à effet de serre estimée à 7%. Cette constatation souligne les avantages environnementaux potentiels d'une incitation au transport par multimodal par le biais d'une réduction des coûts.

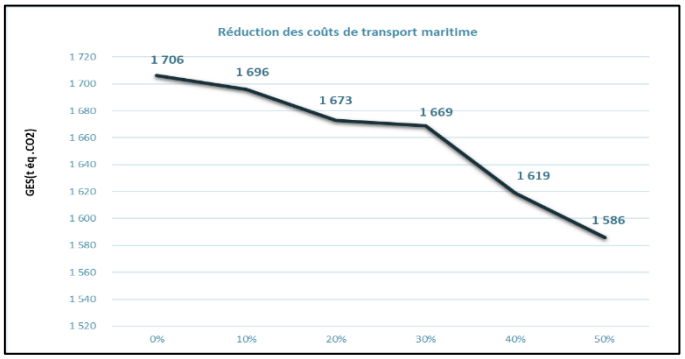


Figure 7 : Impact des coûts du transport maritime sur les émissions de GES

Si la réduction des coûts de transport favorise l'adoption du mode maritime, elle représente également un impact financier positif avec une économie potentielle de 100 031 $ pour 50% de réduction.

6 DISCUSSIONS

Cet article apporte plusieurs contributions à la littérature en proposant un cadre basé sur un cas réel pour optimiser le recyclage des plastiques grâce à l'intégration du transport multimodal et des technologies de tri avancées. Il développe un modèle d'optimisation du réseau logistique, offrant aux décideurs politiques, aux industriels et aux gestionnaires de la chaîne d'approvisionnement un outil d'aide à la décision pour concevoir des systèmes de gestion des déchets plus durables et rentables. L'étude quantifie le compromis entre réduction des coûts et impact environnemental. L'intégration du transport multimodal permet une diminution des coûts de 0,7 %, tandis que le détournement de seulement 1 % du volume des plastiques vers le transport fluvial entraîne une réduction de 5 % des émissions de GES. Ces résultats mettent en évidence les avantages économiques et environnementaux d'une approche logistique plus durable dans le cadre de la logistique inverse.

En fournissant des données exploitables, cette étude offre des recommandations pratiques aux gouvernements, municipalités et organisations de gestion des déchets pour concevoir des réseaux de recyclage plus efficaces et soutenir des politiques favorisant des choix logistiques écologiques. Enfin, elle contribue à une meilleure compréhension de la logistique inverse durable en intégrant des technologies de tri avancées et le transport multimodal pour réduire l'empreinte environnementale. Son cadre évolutif et adaptable peut être appliqué à d'autres régions et systèmes de gestion des déchets.

7 CONCLUSION

Cette étude démontre le potentiel d'un réseau optimisé de recyclage du plastique à faible émission de carbone au Québec, en intégrant le transport multimodal et des infrastructures avancées de tri. L'ajout de deux lignes de tri automatisées (60 000 tonnes/an) pourrait faire passer le taux de récupération du plastique de 39 % à 89 %, permettant de détourner 68 000 tonnes des sites d'enfouissement. L'analyse a identifié Montréal et Victoriaville comme emplacements optimaux, améliorant ainsi l'efficacité des flux logistiques. Bien que les économies financières du transport multimodal restent modestes, son adoption permet une réduction des émissions de GES de 5 %, atteignant 7 % lorsque les coûts externes sont pris en compte.

Ces résultats soulignent l'importance d'une approche systémique combinant logistique optimisée et innovations technologiques pour améliorer la rentabilité et la performance environnementale des réseaux de recyclage. Pour maximiser ces bénéfices, il est impératif d'investir dans des infrastructures de tri avancées et d'optimiser les opérations de collecte afin d'améliorer la quantité et la qualité des matériaux recyclables. Parallèlement, le développement des marchés secondaires pour les plastiques recyclés est essentiel pour pérenniser ces efforts. Des mesures réglementaires et économiques, telles que des certifications, des incitations fiscales et des investissements stratégiques, doivent encourager leur adoption dans l'industrie, en cohérence avec la stratégie d'économie circulaire du Québec.

Les recherches futures devraient approfondir l'optimisation multi-objectifs en intégrant explicitement les émissions de GES en $MtCO_2$ e afin de mieux quantifier les compromis entre durabilité et performance économique. De plus, face aux défis du transport maritime pour de faibles volumes de plastiques, une étude sur l'intégration d'autres flux de déchets municipaux (métal, verre, papier) dans ces réseaux offrirait une perspective élargie et renforcerait la résilience du système. Une telle approche pourrait guider les décideurs vers des solutions plus durables et transférables à d'autres régions confrontées aux mêmes enjeux.

8 RÉFÉRENCES

Ai, Q., Zhang, J., Liu, Q., Zhang, C., Chen, Q., & Yan, J. (2023). Bulk Cargo Multimodal Transportation on Inland Waterways Considering Transport Wastage. *IEEE Access*.

Aviso, K. B., Baquillas, J. C., Chiu, A. S., Jiang, P., Van Fan, Y., Varbanov, P. S., Klemeš, J. J., & Tan, R. R. (2023). Optimizing plastics recycling networks. *Cleaner Engineering and Technology*, *14*, 100632.

Canada, G. o. (2022). *Waste and plastics: Appearance before the Standing Committee – May 3, 2022*. Retrieved from https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/corporate/transparency/briefing-materials/appearance-before-standing-committee-may-3-2022/waste-plastics.html

Commission, E., Mobility, D.-G. f., Transport, Essen, H., Fiorello, D., El Beyrouty, K., Bieler, C., Wijngaarden, L., Schroten, A., Parolin, R., Brambilla, M., Sutter, D., Maffii, S., & Fermi, F. (2020). *Handbook on the external costs of transport – Version 2019 – 1.1*. Publications Office. https://doi.org/doi/10.2832/51388

Fan, Z., Luo, Y., Liang, N., & Li, S. (2023). A Novel Sustainable Reverse Logistics Network Design for Electric Vehicle Batteries Considering Multi-Kind and Multi-Technology. *Sustainability*, *15*(13), 10128.

He, M., Li, Q., Wu, X., & Han, X. (2024). A novel multi-level reverse logistics network design optimization model for waste batteries considering facility technology types. *Journal of Cleaner Production*, 142966.

Huang, L., & Zhao, J. (2022). Optimizing the service network design problem for railroad intermodal transportation of hazardous materials. *Journal of Advanced Transportation*, *2022*(1), 5191104.

Inghels, D., Dullaert, W., & Vigo, D. (2016). A service network design model for multimodal municipal solid waste transport. *European Journal of Operational Research*, *254*(1), 68-79.

Kannan, D., Solanki, R., Darbari, J. D., Govindan, K., & Jha, P. (2023). A novel bi-objective optimization model for an eco-efficient reverse logistics network design configuration. *Journal of Cleaner Production*, *394*, 136357.

Québec, É. E. (2016). *Résultats de l'Analyse du cycle de vie (ACV) des matières recyclables*. É. E. Québec. https://www.eeq.ca/wp-content/uploads/Resultats_ACA_2016_VFF.pdf

Québec, G. d. (1998). *GUIDE DES CROISIÈRES INTERNATIONALES SUR LE SAINT-LAURENT*. Québec

RECYC-QUÉBEC. (2018). *Bilan 2018 de la gestion des matières résiduelles au Québec*. Québec Retrieved from https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/bilan-gmr-2018-complet.pdf

Services, D. E. (2000). *Sorting plastic bottles for recycling*. https://plastics.americanchemistry.com/Sorting-Plastic-Bottles-for-Recycling/

Stallkamp, C., Steins, J., Ruck, M., Volk, R., & Schultmann, F. (2022). Designing a recycling network for the circular economy of plastics with different multi-criteria optimization approaches. *Sustainability*, *14*(17), 10913.

Sun, Y., Li, X., Liang, X., & Zhang, C. (2019). A bi-objective fuzzy credibilistic chance-constrained programming approach for the hazardous materials road-rail multimodal routing problem under uncertainty and sustainability. *Sustainability*, *11*(9), 2577.

Tosarkani, B. M., Amin, S. H., & Ghiasvand, M. R. (2024). Designing a sustainable plastic bottle reverse logistics network: A data-driven optimization approach. *Expert Systems with Applications*, *251*, 123918.

Van Engeland, J., Beliën, J., De Boeck, L., & De Jaeger, S. (2020). Literature review: Strategic network optimization models in waste reverse supply chains. *Omega*, *91*, 102012. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.12.001

Zhu, P., Lv, X., Shao, Q., Kuang, C., & Chen, W. (2024). Optimization of Green Multimodal Transport Schemes Considering Order Consolidation under Uncertainty Conditions. *Sustainability*, *16*(15), 6704.

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Planification des activités de production en serre dans une optique d'efficacité opérationnelle et énergétique : Revue de littérature

ÉLIANE AUDREY NGUEMALEU TCHANGOUE[1], NADIA LEHOUX[2], LOUIS GOSSELIN[3]

[1] Département de génie mécanique et de génie industriel
1065, av. de la Médecine, Université Laval
Québec (Québec), Canada, G1V 0A6
eliane-audrey.nguemaleu-tchangoue.1@ulaval.ca

[2] Département de génie mécanique et de génie industriel
1065, av. de la Médecine, Université Laval
Québec (Québec), Canada, G1V 0A6
nadia.lehoux@gmc.ulaval.ca

[3] Département de génie mécanique et de génie industriel
1065, av. de la Médecine, Université Laval
Québec (Québec), Canada, G1V 0A6
louis.gosselin@gmc.ulaval.ca

***Résumé* – La production en serre est devenue un incontournable dans l'atteinte de l'autonomie alimentaire dans différentes régions du globe. Bien que son efficacité ne soit plus à prouver, les enjeux liés à la consommation d'énergie et la planification des opérations sont un véritable casse-tête pour les producteurs, freinant ainsi le développement de nouvelles serres. Cet article s'intéresse à la planification de la production tout en tenant compte des contraintes énergétiques à travers la réalisation d'une revue de la littérature. Cette revue analyse les approches méthodologiques proposées dans la littérature pour aborder ces deux éléments clés, ainsi que les principaux facteurs identifiés comme influents. L'étude documentaire a permis d'identifier des modèles permettant d'optimiser les paramètres de contrôle de la serre tels que l'éclairage, la ventilation et le chauffage afin de mieux gérer la consommation énergétique. Du point de vue opérationnel, des modèles qui tiennent comptent de la capacité de la serre et de la disponibilité des ressources ont été identifiés; tout cela a permis de définir un cadre théorique guidant la conception d'un outil d'aide à la décision pour la planification des activités en serre.**

***Abstract* – Greenhouse production has become essential in achieving food autonomy in different regions of the world. Although its effectiveness is no longer in doubt, the issues related to energy consumption and planning of operations are a real problem for producers; and this slows down the development of new greenhouses. In this article, we focus on production planning while considering energy constraints. This review analyzes the methodological approaches proposed in the literature to address these two key elements, as well as the main factors identified as influential. The documentary review identified models for optimizing greenhouse control parameters such as lighting, ventilation, and heating to better manage energy consumption. From an operational point of view, models that consider the capacity of the greenhouse and the availability of resources were identified; all of this made it possible to define a theoretical framework guiding the design of a decision support tool for planning greenhouse activities.**

***Mots clés* – Production en serre, Gestion des opérations, Efficacité énergétique.**
***Keywords* – Greenhouse production, Operations management, Energy efficiency.**

1 INTRODUCTION

Au Québec, bien que l'on distingue trois principaux types de climat, de façon générale le climat y est froid et les températures moyennes tournent autour du point de congélation (*Normales climatiques 1981-2010 - Climat du Québec*, s. d.). Compte tenu de ces conditions météorologiques, il est difficile de soutenir une production agricole tout au long de l'année, et l'agriculture en serre est donc devenue le principal moyen pour s'assurer d'avoir des fruits et légumes frais locaux même en hiver.

En 2020, le gouvernement du Québec a mis en place sa stratégie de croissance des serres 2020-2025 avec pour but d'accroitre les superficies de produits cultivées en serre (*Innovation en agroalimentaire - Ottawa et Québec accordent une aide financière de 500 000 $ à l'université Laval*, s. d.) car non seulement la culture en serre permet d'avoir une production agricole à l'année, mais dans certains cas, elle offre aussi des rendements plus élevés que la culture en champs (*Culture des fruits et légumes de serre | Gouvernement du Québec*, s. d.). La

serre étant un microclimat où les paramètres tels que la température, l'éclairage, l'humidité sont sous contrôle afin de favoriser la croissance des cultures, cela implique une grande consommation énergétique afin de maintenir ces paramètres notamment en hiver. Il n'est donc pas étonnant de constater que la consommation énergétique représente environ 50 % des coûts de production en serres (Shen et al., 2018). L'un des principaux enjeux de la culture en serre étant la consommation d'énergie, il devient nécessaire de mettre en place des outils pour aider les producteurs à déployer des stratégies qui non seulement vont leur permettre d'améliorer la consommation énergétique de leurs serres, mais aussi de maintenir un bon rendement au niveau des cultures tout en tenant compte des différentes contraintes de production telle que la capacité, la disponibilité des ressources et la demande.

Le but de cet article est donc de mettre en lumière les différentes techniques et méthodes pouvant être employées pour la gestion des opérations de la serre tout en considérant son efficacité énergétique, à l'aide d'une revue de la littérature. Pour ce faire, des questions de recherche ont d'abord été définies, puis la revue a été menée de manière à identifier des éléments de réponse à ces questions, contribuant à la construction d'un cadre théorique structuré.

La littérature recense de nombreux travaux visant à optimiser l'efficacité énergétique des serres, en mobilisant des approches variées telles que l'analyse de la structure des serres afin de limiter les échanges de chaleur (Trépanier, s. d.). Il a été démontré que des éléments tels que l'orientation de la serre, sa forme, les matériaux qui la composent et le type d'éclairage ont une incidence significative (Trépanier, s. d.). Dans certains cas, 99l'utilisation des énergies renouvelable a été envisagée (Yakub et al., 2024). Différents modèles ont également été développés, certains pour estimer la consommation énergétique (Caouris et al., 1989), (Kittas, 1985), d'autres pour la prédire à partir de données historiques grâce à l'apprentissage machine (Ghiat et Al-Ansari, 2024) ou à partir d'algorithmes (Blasco et al., 2007), (Ghadertootoonchi et al., 2024). D'autres personnes (C. Wang et al., 2024) ont pour leur part proposer un modèle de prédiction du rendement à partir d'une analyse de série temporelle et de saisonnalité de la température de la serre. Du point de vue des modèles d'optimisation, (Cunha et Moura Oliveira, 2003) et (Caixeta-Filho et al., 2002) ont développé des programmes linéaires pour maximiser le revenu net et chaque modèle tient compte de contraintes différentes (l'un des contraintes énergétiques et l'autre des contraintes opérationnelles). Tous ces modèles ont permis d'avoir une meilleure compréhension du mode de fonctionnement des serres, leurs particularités et surtout, de comprendre les enjeux de planification existants.

La structure de l'article est la suivante : la méthodologie de recherche mise en place afin de réaliser la revue de littérature est d'abord décrite. Par la suite, les réponses aux questions de recherche sont présentées. Un cadre théorique est enfin introduit et une conclusion vient clore l'article.

2 METHODOLOGIE DE RECHERCHE

La recherche avait pour but d'identifier les différentes techniques et méthodes pouvant être employées pour la gestion des opérations d'une serre tout en considérant l'efficacité énergétique. Pour ce faire, une revue de littérature a été faite afin d'obtenir une meilleure compréhension des activités de production en serre et des outils déjà présents. Afin de réaliser cette revue, des questions de recherche ont été énoncées à partir d'objectifs spécifiques définis aux préalables. Les questions de recherche ainsi définies sont les suivantes :

1.Quels sont les facteurs qui exercent une influence sur la consommation énergétique dans le domaine de la serriculture ?
2.Quelles sont les méthodes et les stratégies qui ont été développées afin d'améliorer l'efficacité énergétique des serres ?
3.Comment fonctionne la planification des activités de production en serre ?
4.Quelles sont les méthodologies utilisées pour la planification des activités de production en serre ?
5.Quelles sont les méthodes et les stratégies qui ont été développées pour planifier les opérations en serre tout en tenant compte de l'efficacité énergétique ?

Par la suite, pour chacune de ces questions, l'approche du cercle herméneutique de (Boell et Cecez-Kecmanovic, 2010) a été réalisée. Cette approche est un processus itératif qui consiste à faire une première recherche d'articles sur la base de mots-clés et d'opérateurs (équations de recherche), puis de trier les articles trouvés, de sélectionner les plus pertinents, de les lire et d'identifier les principaux éléments (thèmes, auteurs, journaux) pour peaufiner les équations de recherche, explorer de nouveau les bases de données et parvenir à converger vers une série d'articles appropriées pour les travaux.

2.1 Plan de concept

Pour chacune des questions de recherche, un plan de concept a été réalisé. Le tableau qui suit présente pour chacune des questions les mots clés identifiés.

Tableau 1. Plan de concepts

Questions	Concepts	Mots clés
1	Facteurs d'influence	key factors OR influencing factors OR determinants
	Consommation énergétique	energ* consumpt* OR energy efficiency OR energy demand OR energy expentidure
	Serriculture	greenhouse production OR greenhouse cultivation OR greenhouse farming OR protected agriculture
2	Efficacité énergétique	energy efficiency OR energy optimization
	Serriculture	greenhouse production OR greenhouse cultivation OR greenhouse farming OR protected agriculture
	Méthodes et stratégies d'amélioration	improvement methods OR optimization techniques
3	Planification des activités de production	operation* planning OR operation* management OR production planning OR crop scheduling OR production scheduling OR production management
	Serre	Greenhouse OR Protected cultivation OR Controlled environment agriculture
4	Planification des activités de production	operation* planning OR operation* management OR production planning OR crop scheduling OR production scheduling OR production management
	Serre	Greenhouse OR Protected cultivation OR Controlled environment agriculture
	Modèles mathématiques	mathematical model* OR decisions support systems OR planning methods
5	Efficacité énergétique	energy efficiency OR energy optimization
	Serriculture	greenhouse production OR greenhouse cultivation OR greenhouse farming OR protected agriculture
	Planification des opérations	operation* planning OR operationnal management OR production planning

2.2 Recherche d'articles

Une fois le plan de concept élaboré pour chacune des questions, des équations de recherche ont été conçues et utilisées dans les bases de données de recherche, soit *Web of science*, *Compendex* et Inspec. Ces bases données ont été sélectionnées étant donné leur pertinence pour les sciences et le génie et leur capacité à mener rapidement à des articles adéquats. Pour chacune des questions de recherche, les équations employées et consignées dans le tableau suivant ont été utilisées :

Tableau 2. Équations de recherche

Questions	Équations
1	(key factors OR influencing factors OR determinants) AND (energ* consumpt* OR energy efficiency OR energy demand OR energy expentidure) AND (greenhouse production OR greenhouse cultivation OR greenhouse farming OR protected agriculture) NOT gas*
2	(energy efficiency OR energy optimization) AND (greenhouse production OR greenhouse cultivation OR greenhouse farming OR protected agriculture) AND (improvement methods OR optimization techniques) NOT gas*
3	(operation* planning OR operation* management OR production planning OR crop scheduling OR production scheduling OR production management) AND (Greenhouse OR Protected cultivation OR Controlled environment agriculture) NOT gas*
4	(operation* planning OR operation* management OR production planning OR crop scheduling OR production scheduling OR production management) AND (Greenhouse OR Protected cultivation OR Controlled environment agriculture) AND (mathematical model* OR decisions support systems OR planning methods) NOT gas*
5	(energy efficiency OR energy optimization) AND (greenhouse production OR greenhouse cultivation OR greenhouse farming OR protected agriculture) AND (operation* planning OR operationnal management OR production planning) NOT gas*

Il est possible de remarquer que chacune de ces équations de recherche a la mention « NOT gas* » à la fin. Ceci a été fait afin de circonscrire les résultats de recherche et éviter que les bases de données ne retournent des articles qui ne prenaient en compte que la notion de gaz à effet de serre (*greenhouse gases*). Les articles trouvés n'étaient pas toujours en lien avec l'objet de la question de recherche, mais au total 82 articles publiés entre 1982 et 2024 et traitant des différentes considérations du sujet ont été répertoriés.

Ces articles ont ensuite été classifiés selon leur niveau de pertinence et d'importance, et certains d'entre eux ont été retenus selon qu'ils pouvaient apporter une réponse à l'une des questions de recherche ou contribuer à mieux comprendre la problématique. Au final, 33 articles ont été conservés, mais seuls les plus pertinents seront cités dans cet article en raison de l'espace limité.

3 RÉSULTATS

La revue de littérature a permis d'apporter des éléments de réponses aux différentes questions de recherche, tel que décrit dans les prochains paragraphes.

3.1 Quels sont les facteurs qui exercent une influence sur la consommation énergétique dans le domaine de la serriculture ?

Comme présenté dans (Katzin et al., 2022), la consommation énergétique de la serre est influencée par les paramètres de contrôle de celles-ci tels que le chauffage, la ventilation et l'éclairage. Ces paramètres sont à leur tour influencés par le microclimat de la serre et le climat extérieur. Le microclimat de la serre quant à lui dépend des conditions nécessaires à la croissance des plantes (température, taux d'humidité et éclairage). Ces conditions variant d'une plante à l'autre, ceci implique que la nature de la plante a un impact sur la consommation énergétique. Les conditions météorologiques quant à elle peuvent faire varier le climat interne de la serre par des échanges d'énergie, ce qui entraîne une modification des paramètres de contrôle et donc, une influence sur l'utilisation de l'énergie.

La structure, le design et le choix des matériaux exercent également une influence sur la consommation énergétique de la serre. La forme de la serre a un impact sur la quantité d'énergie solaire reçue par celle-ci, et de ce fait, selon l'emplacement géographique de la serre, une forme peut être à privilégier dans une optique d'efficacité énergétique (Badji et al., 2022). Dans (Krug et al., 2007), l'impact sur la consommation énergétique des facteurs tels que les installations écoénergétiques (recours à des écrans thermiques, recours au vitrage simple ou double), la taille de la serre et son type est analysé. Différentes études comme celles de (Trépanier, s. d.) ont démontré que le type d'éclairage et les écrans thermiques sont également des facteurs d'influence.

Ainsi, dès la conception d'une serre, les matériaux et le design choisi ont un impact sur son efficacité énergétique. Les conditions météorologiques affectent l'environnement climatique de la serre et joue aussi un rôle clé dans sa consommation d'énergie.

3.2 Quelles sont les méthodes et les stratégies qui ont été développées afin d'améliorer l'efficacité énergétique des serres ?

Selon la littérature, une amélioration de la consommation énergétique passe par le contrôle ou l'amélioration des facteurs exerçant une influence sur la consommation énergétique.

Plusieurs études ont donc été menées pour améliorer la forme des serres, et il existe aujourd'hui des serres aux formes très diversifiées (Badji et al., 2022) suivant leur emplacement géographique. Par exemple, des études ont permis de déterminer que l'orientation est-ouest des serres était inappropriée en climat méditerranéen, alors qu'en zone aride ou semi-aride, c'est l'orientation la plus avantageuse (Badji et al., 2022). Les résultats présentés dans (Trépanier, s. d.) permettent de déterminer que l'éclairage LED et les écrans thermiques ont un impact significatif sur la réduction de la consommation énergétique en climat nordique. Des analyses de scénarios menées dans une serre au Pays-Bas ont permis de conclure que les serres pouvaient être chauffées uniquement grâce à l'éclairage (sans usage de chaudières), mais que ceci était

intéressant du point de vue de l'efficacité énergétique uniquement s'il s'agissait d'éclairage LED (Katzin et al., 2023).

Par ailleurs, avec l'avancée de la technologie, le concept d'agriculture intelligente ou agriculture de précision est né. Ceci a entraîné l'introduction de capteurs dans les serres et de mécanismes de contrôles avancés (Dzitac et al., 2023). Étant donné que les paramètres du microclimat exercent une grande influence sur la consommation énergétique, des modèles ont été mis en place pour monitorer le microclimat ou encore le simuler et aider à la prise de décision en vue d'améliorer la consommation énergétique. Entre autres modèles, celui de (Rizwan et al., 2023) permet, grâce aux données climatiques extérieures et intérieures (obtenues grâces aux capteurs), de prédire les paramètres du climat au temps t+1. Le modèle permet donc d'obtenir les paramètres optimaux de la serre qui contribuent à réduire la consommation énergétique compte tenu du coût de l'électricité. Les paramètres optimaux ainsi obtenus sont transférer à des actionneurs pour paramétrer l'environnement interne de la serre. (B. Wang et al., 2024) ont proposé un contrôleur de température basé sur un modèle MFAC (*Model-Free Adaptive Control*) qui permet d'obtenir un bon équilibre entre la précision des paramètres de contrôle et la consommation énergétique. Ce contrôleur a permis de réduire la consommation énergétique de 12,35%. Un autre contrôleur présenté par (Ghiat et Al-Ansari, 2024) est quant à lui basé sur le modèle MBPC (*Model-Based Predictive Control*). Ce contrôleur a pour but de réduire la consommation d'eau et d'énergie de la serre, et la résolution se fait au travers d'algorithmes génétiques.

Il y a un intérêt de plus en plus soutenu pour l'utilisation de modèles de contrôle en serriculture afin de mieux gérer les serres (Katzin et al., 2022). Cet intérêt grandissant, combiné à la versatilité des serres (structure, équipements, plantes, objectifs) est à l'origine d'une abondance de modèles dans la littérature. En 2020, (Katzin et al., 2022) a d'ailleurs pu identifier jusqu'à 32 modèles pertinents qui ont été publiés entre 2018 et 2020.

3.3 Comment fonctionne la planification des activités de production en serre ?

En explorant la littérature, on trouve peu d'éléments concernant la planification des opérations dans l'industrie de la serriculture. La plupart des articles traitent plutôt de la gestion de la serre du point de vue du contrôle du climat de la serre, du rendement des cultures ou de la consommation énergétique. Cependant, les travaux menés par le consortium HOPLICCS (Callewaert et Lippert, 2000) permettent de comprendre ce que la planification des opération implique en horticulture. Il en ressort que le choix des cultures et l'allocation d'espace à chacune des cultures sont des enjeux importants de la planification. Cette planification est sujette aux contraintes en lien avec la disponibilité de la main-d'œuvre, les équipements, le temps de cycle de chaque culture et leur impact sur la performance de l'entreprise ainsi que la demande.

D'un point de vue tactique (moyen terme), la planification consiste à faire des plans de production saisonniers en fonction des commandes ou des prévisions de ventes, de la disponibilité des ressources, des matières premières (semences) et du modèle de croissance des plantes (qui varie selon la saison).

D'un point de vue opérationnel (court terme), la planification consiste à gérer les opérations de la serre telles que l'allocation des ressources, la segmentation des espaces de culture et l'ajustement des paramètres de contrôle du climat.

(Callewaert et Lippert, 2000) ont proposé un cadre conceptuel de planification en horticulture qui se base sur le cadre conceptuel de planification des opérations utilisés en industrie de façon générale. Le cadre ne prend donc pas vraiment en considération les spécificités liées à la culture en serre. Entre autres, la croissance des plantes est un phénomène biologique difficilement prédictible. Par ailleurs, il existe une corrélation entre l'espace disponible et la croissance des plantes (plus d'espace implique une plus grande croissance) (Valle De Souza et al., 2024). Une autre particularité en horticulture est que le temps de cycle de production d'un même produit peut varier selon la décision du producteur ; c'est ce dernier qui décide du niveau de maturité du produit final et donc du moment de la récolte (Valle De Souza et al., 2024). De plus, la demande et le prix de vente varient selon le niveau de maturité du produit final. Une autre différence dans la serriculture est le fait que les produits finis ne peuvent pas être gardés en stock longtemps, étant donné qu'il s'agit de denrées périssables avec un cycle de vie court. La chaîne d'approvisionnement pour de tels produits requiert alors une synchronisation efficace entre la distribution des produits et la production, d'où l'importance de plans de production par période (Pratap et al., 2022)

La planification des activités de production en serre est similaire à la planification de la production telle qu'on la connaît en industrie. Elle doit tenir compte des contraintes de capacité et de disponibilité des ressources tout en répondant à la demande de façon à maximiser les revenus. Cependant, la serriculture a des contraintes qui lui sont propres, étant donné que des phénomènes biologiques qui ne sont pas toujours contrôlables interviennent dans le processus de production.

3.4 Quelles sont les modèles mathématiques pour la planification des activités de production en serre ?

Compte tenu du peu d'informations présents dans la littérature sur la planification des activités en serre, il n'a été possible d'identifier que deux modèles pertinents.

Le premier modèle est un modèle de programmation linéaire développé par (Caixeta-Filho et al., 2002) pour la production de fleurs de lys en serre au Brésil. Avec un marché devenant de plus en plus compétitif et une complexité accrue des opérations en serre (dû à la multiplicité des paramètres à contrôler), il devenait de plus en plus difficile pour la compagnie *Jan de Wit* de planifier ses opérations manuellement (Caixeta-Filho et al., 2002). C'est dans ce contexte qu'un modèle de gestion des opérations a été mis sur pied avec pour fonction objectif la maximisation de la marge contributive du producteur. Les contraintes applicables sont les limites de ventes du marché, le nombre minimum de bourgeons et de tiges pour commercialiser les fleurs, l'inventaire de bulbes disponible, l'espace disponible pour la culture selon la variété de fleurs, leur espacement et le type de serre.

La variable de décision calculée par le modèle est la quantité de fleur en pot ou en tige obtenue d'un lot de bulbes spécifiques d'une variété précise en tenant compte de la semaine de plantation et de la semaine de récolte. Il s'agit essentiellement d'un problème de mise en culture avec pour but de déterminer quelle quantité de bulbes de fleurs mettre en culture à une période de plantation donnée en vue d'une récolte à une date précise, tout en respectant les contraintes liées à la disponibilité

des plants de lits et des bulbes de même que les limites de ventes. Le modèle ainsi conçu permet d'obtenir le plan de production optimal qui respecte les limites opérationnelles et les contraintes techniques.

Le deuxième modèle est celui proposé par (Saedt et al., 1991) dans le cadre de la production de plantes en pots aux Pays-Bas. Étant donné la variété de plantes en pots qui sont cultivées dans les différentes serres néerlandaises et les différentes conditions de croissance de chacune des plantes, ce modèle vient soutenir les producteurs afin de mieux planifier leurs opérations et augmenter leurs revenus nets. Ce modèle a d'ailleurs été implanté dans différentes serres et une croissance de 10% du revenu a été enregistrée (Saedt et al., 1991). Il reprend certains éléments du modèle de (Caixeta-Filho et al., 2002), notamment en ce qui concerne les contraintes liées à l'espace disponible et les quantités limites de plants à mettre en culture par période. La principale différence entre les deux modèles est que celui présenté par (Saedt et al., 1991) introduit une contrainte sur la disponibilité de la main d'œuvre pour planter et entretenir les plants. Le modèle inclut également la possibilité d'avoir recours à de l'espace ou de la main d'œuvre supplémentaire. Ce choix entraîne l'utilisation de coefficients de pénalité lorsque le modèle viole les contraintes de capacité et ceci se reflète dans la fonction objectif où la marge contributive est imputée selon le niveau de violation des dites contraintes de capacité. La variable de décision étant le nombre de plants d'un produit donné à planter à une période précise dans un emplacement dédié, ce modèle vise ainsi à obtenir la meilleure séquence de rotation des cultures (dans un contexte de polyculture) en tenant compte des différents cycles de croissance, de l'espace et des ressources disponibles.
Par ailleurs contrairement au modèle précédent qui présentait une planification par semaine par défaut, ce modèle permet de segmenter l'année par période et donc de faire une planification sur l'horizon souhaité. Cependant, il ne propose pas une solution optimale, mais bien une solution réalisable. Donc le plan de production obtenu via ce modèle est un point de départ pour le producteur qui peut le bonifier à sa convenance (Saedt et al., 1991).

Les systèmes d'aide à la décision pour la planification de la production en serre apparaissent donc comme des alliés importants pour les producteurs. Ceux-ci leur permettent d'augmenter leurs revenus tout en respectant les différentes contraintes existantes, et en p.

3.5 Quelles sont les méthodes et les stratégies qui ont été développées pour planifier les opérations en serre tout en tenant compte de l'efficacité énergétique ?

Suite à l'analyse de la littérature, il a été possible d'observer que soit les auteurs proposent des modèles d'optimisation comme ceux présentés plus haut qui maximisent la marge contributive sans égard concret pour la consommation énergétique, soit ils développent des modèles de maximisation du rendement tout en minimisant la consommation énergétique comme ceux présentés dans (Gong et al., 2023) et (Li et al., 2023). Ces modèles peuvent rendre possible la planification si l'on fonctionne en flux poussé (pas de contraintes liées à la demande), mais il n'en demeure pas moins qu'ils ne tiennent pas compte des contraintes de capacité ou de disponibilité des matières premières (semences). Par ailleurs (Van Henten et al., 2006) proposent un modèle qui détermine la production au temps t+1 en fonction de celle du temps t, de la température moyenne de la serre et de la radiation solaire. Un modèle qui décrit la relation entre la température moyenne de la serre et la consommation énergétique est également présenté, et par la suite une fonction objectif avec pour but de limiter les variations dans la production tout en minimisant la consommation énergétique est introduite. Bien que le modèle joue principalement un rôle de régulation, la fonction objectif ainsi développée peut aussi faire office d'outil d'aide à la décision pour la planification des opérations dans un contexte de flux poussé et les contraintes liées à la capacité peuvent être intégrées en fixant une production au temps t_0 qui respecte ces contraintes. Cela reste toutefois viable uniquement dans le cadre d'une culture sans rotation sur le long de la période. Autrement dit, on ne change pas la combinaison de produits sur l'horizon de planification.

Un autre modèle proposé est celui de (Cunha et Moura Oliveira, 2003) qui comprend une fonction d'optimisation qui maximise le revenu net du producteur. Celle-ci inclut une fonction de bénéfice et une fonction de coûts qui tiennent compte des paramètres de l'environnement interne et externe de la serre et donc de la consommation énergétique. La fonction objectif est supportée par un modèle de climat de la serre, un modèle de croissance des plantes et un modèle de prédiction de la météo. Tout autant que les modèles précédents, ce dernier modèle peut être utile pour la planification s'il intègre les contraintes liées à la capacité, aux ventes et à la disponibilité des ressources.

Ces différents modèles ont pu être identifiés au travers de la revue de littérature, mais n'ont pas pour but principal la planification des activités de production. Malheureusement, aucun des articles trouvés n'a permis d'établir clairement l'existence d'une méthode ou d'une stratégie ayant pour but d'aider à la planification des opérations tout en considérant la consommation énergétique.

Toutes ces considérations ont mené à l'élaboration d'un cadre théorique pour la conception d'un modèle d'optimisation de la planification des opérations qui intègre aussi la consommation énergétique, tel que présenté dans la prochaine section.

4 CADRE THEORIQUE POUR LA CONCEPTION D'UN OUTIL DE PLANIFICATION DES ACTIVITES DE PRODUCTION EN SERRE QUI MINIMISE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE

Bien que la littérature ne présente pas de modèle intégré nous permettant de cibler notre problématique, il a été possible d'identifier les principales composantes nécessaires à la mise en place d'un outil de planification de la production en serre qui tienne compte de la consommation énergétique. Ces éléments sont décrits ci-bas :

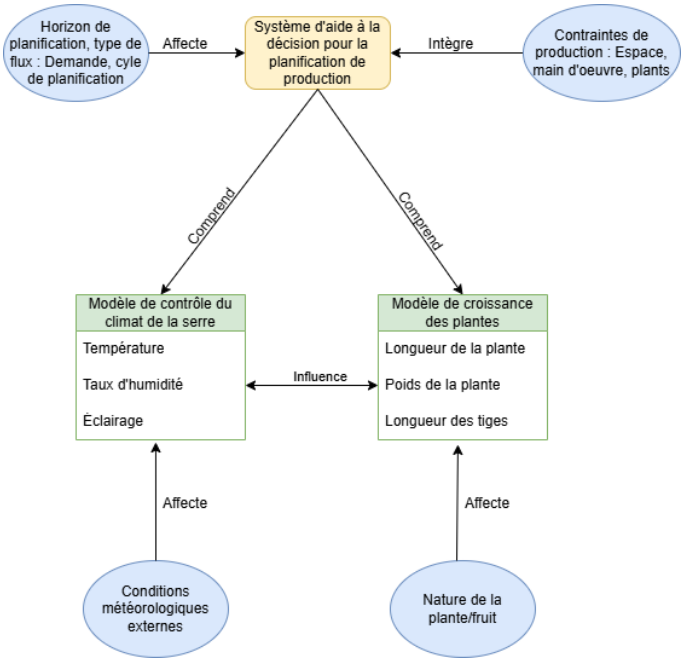


Figure 1 Cadre théorique pour la conception d'un outil de planification de la production en serre dans une optique d'efficacité opérationnelle et énergétique

La première composante à mettre en place est un modèle de contrôle du climat de la serre. Un tel modèle a pour but de prédire ou d'obtenir les paramètres (température, taux d'humidité, radiation solaire, etc.) du climat interne de la serre compte tenu des conditions météorologiques et des paramètres de contrôle. Selon le niveau de planification, ce modèle va agir de façon prédictive (planification tactique) ou de façon opérationnelle (planification en temps réel). Étant donné que la planification tactique se fait sur un horizon futur, il est nécessaire d'avoir soit un modèle de prédiction des conditions météorologiques externes (si l'horizon de planification est très long), soit les prévisions météos déjà disponibles. Il est à noter qu'il existe déjà plusieurs modèles de contrôle du climat dans la serre (Katzin et al., 2022) qui permettent de faire la lumière là-dessus.

La deuxième composante essentielle est un modèle de croissance des cultures. Un tel modèle a pour but d'évaluer la croissance des plantes selon les paramètres du climat interne de la serre, des conditions de croissance de la plante (humidité, température et éclairage requis) et de son cycle de croissance. Ce modèle permettra de prédire le rendement des cultures selon la période d'ensemencement et la période de récolte.

La troisième composante est le modèle d'optimisation. Il s'agit d'un modèle de programmation mathématique ayant pour but de proposer un plan de production qui respecte les différentes contraintes de production (capacité de la serre, contraintes techniques, disponibilité des matières premières, conditions météorologiques, paramètres du climat interne). Il existe différents modèles d'optimisation dans la littérature, mais n'ayant pas tous la même fonction objectif ou toutes les contraintes. Une solution envisageable est la fusion de modèles complémentaires comme celui de (Caixeta-Filho et al., 2002) et de (Cunha et Moura Oliveira, 2003).

Les composantes ainsi décrites constituent une base générale pour la conception de l'outil d'aide à la décision souhaité. Par ailleurs, il est important de mentionner certaines considérations qui peuvent apporter des contraintes supplémentaires ou des spécificités particulières :

-Selon qu'on effectue une monoculture ou une polyculture, les contraintes de production ne sont pas les mêmes. Ceci est dû au fait que les plantes n'ont pas toutes les mêmes conditions de croissance, ni le même cycle de production. Par conséquent, dans le cas d'une polyculture, le modèle devra intégrer des contraintes de production propres à chaque plante et trouver les paramètres optimaux qui respectent cet ensemble de contraintes.

-L'horizon de planification est un élément à préciser et qui est susceptible de faire changer certains paramètres du modèle ou mêmes les données d'entrées. Il est également important de mentionner que dans le cadre d'une rotation des cultures, la planification sur le long terme est incontournable.

-Selon qu'on fonctionne en flux poussé ou en flux tiré, le modèle à adopter devra différer. En flux poussé, on peut simplement avoir une fonction objectif qui maximise les bénéfices pour le producteur, sans contraintes sur les quantités à produire. En flux tiré, le modèle peut s'avérer un peu plus complexe car les quantités produites doivent être calquées sur la demande ou les commandes, ce qui peut avoir un impact sur la capacité nécessaire à la production. Dans ce contexte, la possibilité d'avoir de la capacité supplémentaire doit être intégrée au modèle avec une pénalité lorsque ces ressources sont utilisées (Saedt et al., 1991), ceci pour éviter d'avoir un modèle sans solution.

5 CONCLUSION

Le but de cet article était de mettre en lumière les différentes techniques et méthodes pouvant être employées pour la gestion des opérations d'une serre tout en considérant l'efficacité énergétique. Les questions de recherche énoncées ont permis de préciser notre méthode de recherche et d'interroger les bases de données. Des éléments de réponses ont pu être apportées aux différentes questions et la revue de littérature a permis de mettre en relief les différentes facettes de la planification des activités en serre. Divers modèles explorant ces facettes sont présents dans la littérature, et l'analyse de ces modèles et leurs singularités respectives a permis d'établir un cadre théorique pour la conception d'un outil d'aide à la décision pour la gestion des opérations tout en améliorant l'efficacité énergétique. Des travaux futurs pourraient porter sur la conception d'un tel outil et l'analyse de son impact sur les activités de production d'une serre. Des travaux pourraient également être effectués pour tenir compte de l'impact du mode de tarification de l'électricité sur un tel outil, ou encore les contraintes liées à la distribution des produits finis.

6 REMERCIEMENTS

Ce travail fait partie d'un projet financé par le « Programme de partenariat pour l'innovation en agroalimentaire » dans le cadre du Partenariat canadien pour l'agriculture, une entente entre les gouvernements du Canada et du Québec. Les auteurs remercient le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) et ses partenaires.

7 REFERENCES

Badji, A., Benseddik, A., Bensaha, H., Boukhelifa, A. et Hasrane, I. (2022). Design, technology, and management of greenhouse: A review. *Journal of*

Cleaner Production, *373*, 133753. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133753

Blasco, X., Martínez, M., Herrero, J. M., Ramos, C. et Sanchis, J. (2007). Model-based predictive control of greenhouse climate for reducing energy and water consumption. *Computers and Electronics in Agriculture*, *55*(1), 49-70. https://doi.org/10.1016/j.compag.2006.12.001

Boell, S. K. et Cecez-Kecmanovic, D. (2010). Literature Reviews and the Hermeneutic Circle. *Australian Academic & Research Libraries*, *41*(2), 129-144. https://doi.org/10.1080/00048623.2010.10721450

Caixeta-Filho, J. V., Van Swaay-Neto, J. M. et Wagemaker, A. D. P. (2002). Optimization of the Production Planning and Trade of Lily Flowers at Jan de Wit Company. *Interfaces*, *32*(1), 35-46. https://doi.org/10.1287/inte.32.1.35.13

Callewaert, L. et Lippert, T. (2000). HOPLICCS : HORTICULTURAL PLANNING AND INTEGRATED COST CONTROL SYSTEMS. *Acta Horticulturae*, (519), 221-230. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2000.519.23

Caouris, Y. G., Kittas, C. et Santamouris, M. (1989). Regional monthly estimation of greenhouse energy consumption—application to Greece. *Solar & Wind Technology*, *6*(3), 225-233. https://doi.org/10.1016/0741-983X(89)90073-8

Culture des fruits et légumes de serre | Gouvernement du Québec. (s. d.). https://www.quebec.ca/agriculture-environnement-et-ressources-naturelles/agriculture/industrie-agricole-au-quebec/productions-agricoles/culture-fruits-legumes-serre-serriculture

Cunha, J. B. et Moura Oliveira, J. P. (2003). *OPTIMAL MANAGEMENT OF GREENHOUSE ENVIRONMENTS*. EFITA 2003 Conference, Hongrie.

Dzitac, S., Cheregi, A., Simo, A. et Badea, G. E. (2023). Digitization of the Characteristic Parameters of a Greenhouse in Order to Streamline Energy Consumption. Dans S. Dzitac, D. Dzitac, F. G. Filip, J. Kacprzyk, M.-J. Manolescu et H. Oros (dir.), *Intelligent Methods Systems and Applications in Computing, Communications and Control* (vol. 1435, p. 135-143). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16684-6_11

Ghadertootoonchi, A., Solaimanian, A. et Khajehpour, H. (2024, 14 février). *Multi-objective stochastic optimization of a greenhouse energy system using an integrated demand-supply model*. 2024 9th International Conference on Technology and Energy Management (ICTEM), Behshar, Mazandaran, Iran, Islamic Republic of (p. 1-5). https://doi.org/10.1109/ICTEM60690.2024.10631906

Ghiat, I. et Al-Ansari, T. (2024). Enhancing efficiency in closed agricultural greenhouses: A data-driven predictive model for energy consumption. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1372*(1), 012084. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1372/1/012084

Gong, L., Yu, M. et Kollias, S. (2023). Optimizing Crop Yield and Reducing Energy Consumption in Greenhouse Control Using PSO-MPC Algorithm. *Algorithms*, *16*(5), 243. https://doi.org/10.3390/a16050243

Innovation en agroalimentaire - Ottawa et Québec accordent une aide financière de 500 000 $ à l'université Laval. (s. d.). Gouvernement du Québec. https://www.quebec.ca/nouvelles/actualites/details/innovation-en-agroalimentaire-ottawa-et-quebec-accordent-une-aide-financiere-de-500-000-a-luniversite-laval-39956

Katzin, D., Marcelis, L. F. M., Van Henten, E. J. et Van Mourik, S. (2023). Heating greenhouses by light: A novel concept for intensive greenhouse production. *Biosystems Engineering*, *230*, 242-276. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.04.003

Katzin, D., Van Henten, E. J. et Van Mourik, S. (2022). Process-based greenhouse climate models: Genealogy, current status, and future directions. *Agricultural Systems*, *198*, 103388. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103388

Kittas, C. (1985). Simple Model to Estimate the Energy Consumption of Heating Greenhouses in Greece. *Modelling, simulation & control. B*, *5*(3), 1-15.

Krug, H., Romey, A. et Rath, T. (2007). Decision support for climate dependent greenhouse production planning and climate control by modelling. I. Modelling climate. *EUROPEAN JOURNAL OF HORTICULTURAL SCIENCE, Volume:72, Numéro:3, Page(s):97-103*.

Li, K., Mi, Y. et Zheng, W. (2023). An Optimal Control Method for Greenhouse Climate Management Considering Crop Growth's Spatial Distribution and Energy Consumption. *Energies*, *16*(9), 3925. https://doi.org/10.3390/en16093925

Normales climatiques 1981-2010 - Climat du Québec. (s. d.). https://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/normales/climat-qc.htm

Pratap, S., Jauhar, S. K., Paul, S. K. et Zhou, F. (2022). Stochastic optimization approach for green routing and planning in perishable food production. *Journal of Cleaner Production*, *333*, 130063. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130063

Rizwan, A., Khan, A. N., Ahmad, R. et Kim, D. H. (2023). Optimal Environment Control Mechanism Based on OCF Connectivity for Efficient Energy Consumption in Greenhouse. *IEEE Internet of Things Journal*, *10*(6), 5035-5049. https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3222086

Saedt, A. P. H., Hendriks, T. H. B. et Smits, F. M. (1991). A transition planning method applied in a decision support system for potplant nurseries. *European Journal of Operational Research*, *52*(2), 142-154. https://doi.org/10.1016/0377-2217(91)90076-8

Shen, Y., Wei, R. et Xu, L. (2018). Energy Consumption Prediction of a Greenhouse and Optimization of Daily Average Temperature. *Energies*, *11*(1), 65. https://doi.org/10.3390/en11010065

Trépanier, M.-P. (s. d.). Dynamic modeling of energy consumption and yield in greenhouse horticulture: Impact of energy efficiency measures, lighting systems, location, and climate change.

Valle De Souza, S., Shasteen, K. C., Seong, J., Kubota, C., Kacira, M. et Peterson, H. C. (2024). Production planning in an indoor farm: Using time and space requirements to define an efficient production schedule and farm size. *International Food and Agribusiness Management Review*, *27*(2), 237-255. https://doi.org/10.22434/ifamr2023.0038

Van Henten, E. J., Buwalda, F., De Zwart, H. F., De Gelder, A., Hemming, J. et Bontsema, J. (2006). TOWARD AN OPTIMAL CONTROL STRATEGY FOR SWEET PEPPER CULTIVATION - 2. OPTIMIZATION OF THE YIELD PATTERN AND ENERGY EFFICIENCY. *Acta Horticulturae*, (718), 391-398. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.718.45

Wang, B., Li, X., Xu, M. et Wang, L. (2024). Research on improved partial format MFAC greenhouse temperature control method based on low energy consumption optimization. *Computers and Electronics in Agriculture*, *220*, 108845. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108845

Wang, C., Zhang, Y., Cao, K., Gao, X. et Zhang, J. (2024, 23 février). *Research on Greenhouse Energy Consumption Simulation and Yield Prediction Model Based on Time Series Analysis*. 2024 International Conference on Integrated Circuits and Communication Systems (ICICACS), Raichur, India (p. 1-7). https://doi.org/10.1109/ICICACS60521.2024.10498198

Yakub, A. O., Adesanya, M. A., Same, N. N., Rabiu, A., Chaulagain, D., Ogunlowo, Q. O., Owolabi, A. B., Park, J., Lim, J.-O., Lee, H.-W. et Huh, J.-S. (2024). Enhancing sustainable and climate-resilient agriculture: Optimization of greenhouse energy consumption through microgrid systems utilizing advanced meta-heuristic algorithms. *Energy Strategy Reviews*, *54*, 101440. https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101440

CIGI QUALITA MOSIM 2025

Une politique dynamique de point de couverture environnemental pour les systèmes hybrides de fabrication et de refabrication sous contraintes d'émissions des GES

HASSAN AARAB[1], ALI GHARBI[1], MUSTAPHA OUHIMMOU[1]

[1] Département de Génie des Systèmes, École de Technologie Supérieure, Laboratoire de Conception et de Contrôle des Systèmes de Production, 1100 Notre Dame Street West, Montréal, QC, Canada, H3C 1K3

HASSAN.AARAB.1@ENS.ETSMTL.CA

ALI.GHARBI@ETSMTL.CA

MUSTAPHA.OUHIMMOU@ETSMTL.CA

Résume

Les systèmes hybrides de fabrication/refabrication offrent des solutions prometteuses pour une production durable en intégrant des stratégies de logistique inverse et en réduisant les émissions de gaz à effet de serre (GES). Cependant, il est difficile d'équilibrer les coûts et les contraintes environnementales dans ces systèmes, en particulier dans des contextes stochastiques impliquant des pannes de machines et des processus de réparation. Cette étude présente une politique dynamique de points de couverture environnementale adaptée aux systèmes hybrides. Cette politique ajuste dynamiquement les taux de production en fonction des seuils d'inventaire, des niveaux d'émissions et de la disponibilité des machines, en donnant la priorité à la fabrication ou à la refabrication afin d'optimiser les coûts totaux et l'impact sur l'environnement. La politique proposée est dérivée de la théorie du contrôle stochastique et validée par une résolution numérique. Les résultats démontrent que la politique proposée minimise les coûts d'inventaire, d'arriéré, de production et d'émissions. En comblant les lacunes de la littérature, ce travail fournit un cadre pour les systèmes de production hybrides sous contraintes environnementales, contribuant ainsi à une planification durable de la production.

Abstract

Hybrid manufacturing/remanufacturing systems offer promising solutions for sustainable production by integrating reverse logistics strategies and reducing greenhouse gas (GHG) emissions. However, balancing costs and environmental constraints in these systems is challenging, particularly in stochastic contexts involving machine failures and repair processes. This study presents a dynamic environmental hedging point policy tailored to hybrid systems. The policy dynamically adjusts production rates based on inventory thresholds, emission levels, and machine availability, giving priority to manufacturing or remanufacturing in order to optimize total costs and environmental impact. The proposed policy is derived from stochastic control theory and validated through numerical resolution. The results show that the proposed policy minimizes inventory, backlog, production, and emission costs. By addressing gaps in the literature, this work provides a framework for hybrid production systems under environmental constraints, thereby contributing to sustainable production planning.

Mots clés **– Optimisation stochastique, Systèmes de production hybrides, Politiques de contrôle de production, Résolution numérique**

1 INTRODUCTION

Les politiques de contrôle de production jouent un rôle essentiel dans l'optimisation des systèmes de fabrication, en particulier dans des conditions dynamiques et stochastiques. Les politiques de point de couverture (Hedging Point Policies - HPPs) sont largement adoptées pour leur capacité à équilibrer les taux de production et les niveaux d'inventaire [Akella et Kumar, 1986; Kenne et Gharbi, 2000]. Cependant, les politiques traditionnelles négligent souvent les impacts environnementaux, notamment les émissions de gaz à effet de serre (GES). Pour pallier cette limitation, les politiques de point de couverture environnemental (Environmental Hedging Point Policies - EHPPs) ont été proposées, intégrant la taxe carbone et les plafonds d'émissions dans les processus décisionnels [Afshar-Bakeshloo et al., 2018; Ben-Salem et al., 2015]

Parallèlement, la refabrication s'est imposée comme une stratégie clé en logistique inverse, offrant des avantages tels que la réduction des déchets, la conservation des ressources et les économies de coûts. Contrairement à la fabrication, qui repose sur des processus plus intensifs en énergie et génère une empreinte carbone plus élevée, la refabrication permet généralement de limiter les émissions en réutilisant des composants existants. Bien que certains processus, comme le démontage et le nettoyage, puissent être énergivores, la refabrication reste une alternative plus écologique dans la majorité des cas. Par exemple, plusieurs études montrent que dans certaines industries, comme celle des boites à vitesses et les alternateurs, les produits refabriqués affichent une empreinte carbone inférieure à celle des produits neufs [Sundin et Lee, 2012].

Ces défis soulignent la nécessité d'un cadre de contrôle dynamique synchronisant les opérations de fabrication et de refabrication tout en intégrant les contraintes environnementales. Cette étude cherche à répondre à des questions cruciales : Comment les systèmes hybrides peuvent-ils minimiser les coûts d'inventaire, de pénurie, de production et des émissions tout en respectant les réglementations environnementales ? Quand et à quels taux les machines de fabrication ou de refabrication doivent-elles fonctionner pour assurer une production durable ?

Ce travail introduit une politique de contrôle de production quasi-optimale adaptée aux systèmes de production hybrides sujets aux pannes et soumis à une réglementation de taxe carbone. Fondée sur la théorie du contrôle optimal stochastique, cette politique contrôle dynamiquement les opérations en équilibrant les objectifs économiques et environnementaux.

2 REVUE DE LITTERATURE

La littérature sur les systèmes hybrides de fabrication/refabrication peut être classée en deux grandes catégories : les systèmes sans contrôle explicite des émissions de gaz à effet de serre et les systèmes avec contrôle des émissions de gaz à effet de serre. À l'intérieur de ces catégories, d'autres subdivisions permettent de déterminer si les modèles intègrent des défaillances de machines ou pas.

2.1 Systèmes sans contrôle des émissions de GES

Les premières études se sont principalement concentrées sur la minimisation des coûts et la gestion des stocks sans intégrer de considérations environnementales. Par exemple, [Liu et al., 2018] ont étudié les stratégies de production et de tarification pour les systèmes hybrides monopolistiques, tandis que [Farahani et al., 2020] ont étudié les politiques de disposition optimales pour les systèmes de remise à neuf. [Aminipour et al., 2021] ont proposé une approche cyclique pour les chaînes d'approvisionnement en boucle fermée, visant à réduire les coûts de mise en place et de stockage. Cependant, ces travaux ont ignoré à la fois les émissions et le manque de fiabilité des machines.

Dans les systèmes traitant des défaillances des machines, les HPPs se sont avérés efficaces. [Turki et al., 2017] ont appliqué le HPP aux systèmes hybrides en cas de défaillance, tandis que [Assid et al., 2019] ont optimisé les politiques de production et d'élimination dans des conditions stochastiques. [Assid et al., 2023] ont proposé une politique de contrôle intégrée pour les systèmes hybrides comportant deux installations sujettes aux pannes. Cette politique optimise les taux de production et d'élimination tout en assurant une transition dynamique entre la fabrication et la refabrication. Bien que ces études tiennent compte du manque de fiabilité des machines, elles omettent les impacts environnementaux.

2.2 Systèmes avec contrôle des émissions de GES

Les recherches dans cette catégorie intègrent les contraintes d'émissions par le biais de taxes carbone ou de mécanismes de plafonnement et d'échange. [Gong et Zhou, 2013] ont proposé une planification optimale de la production dans le cadre de l'échange de droits d'émission, tandis que [Chen et al., 2020] ont étudié un système de refabrication en situation de monopole soumis à des réglementations sur la reprise des produits et les capacités d'émissions, en analysant les effets économiques et environnementaux des contraintes réglementaires. [Liao & Li, 2021] ont proposé une méthode de commande durable dans les chaînes d'approvisionnement en boucle fermée, démontrant comment l'extension du modèle EOQ permet de réduire les émissions équivalentes en carbone. Cependant, peu d'études ont abordé à la fois le manque de fiabilité des machines et les contraintes liées aux GES. Les exceptions notables sont [Turki et al., 2018], [Entezaminia et al., 2020, 2021] et [Kenné et al., 2024] et qui ont étendu les cadres EHPP aux systèmes non fiables. Malgré ces avancées, des lacunes subsistent dans la conception de politiques intégrées pour des systèmes hybrides privilégient la fabrication et la refabrication tout en assurant une collaboration efficace pour satisfaire la demande des clients.

3 FORMULATION DU PROBLEME

Le système hybride, illustré dans la figure 1, se compose de deux machines : une machine de fabrication (M1) et une machine de refabrication (M2). Les deux machines sont sujettes à des pannes et à des réparations aléatoires et produisent des émissions de gaz à effet de serre.

Le système peut être modélisé comme un processus de Markov en temps continu avec des états discrets. Nous notons l'état global du système $\varepsilon(t)$, avec l'espace d'états défini comme B= {1,2,3,4}. Chaque état, décrit dans le tableau 1, correspond à la condition opérationnelle des deux machines.

Tableau 1 États du système

Etat du système $\boldsymbol{\varepsilon(t)}$	Etat de M1 $\boldsymbol{\varepsilon_1(t)}$	Etat de M1 $\boldsymbol{\varepsilon_2(t)}$
1	1	1
2	1	0
3	0	1
4	0	0

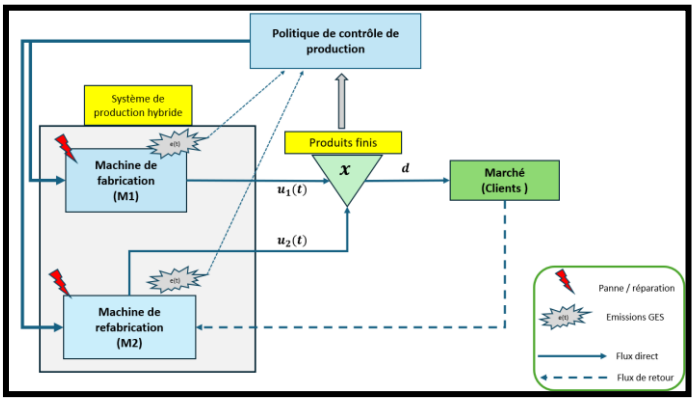


Figure 1 Système hybride étudié

Avec :

- $u_1(.)$: *taux de production de la machine* $M1$
- $u_2(.)$ :: *taux de production de la machine* $M2$
- $x(t)$: *niveau d'inventaire des produits fini à l'instant* t.
- $e(t)$: *niveau d'émissions GES du système à l'instant* t.
- $\varepsilon(t)$: *processus stochastique du système hybride*
- $\varepsilon_1(t)$: *processus stochastique de la machine* $M1$
- $\varepsilon_2(t)$: *processus stochastique de la machine* $M2$
- x^+: *stock positif* $= max(0, x(t))$ *pour* $x(t) > 0$
- x^-: *stock négatif* $= max(0, -x(t))$ *pour* $x(t) < 0$
- d : *taux de demande*
- d_r : *taux de produits retournés*
- ${U^1}_{max}$: *taux de production max pour la machine* $M1$
- ${U^2}_{max}$ :: *taux de production max pour la machine* $M2$
- q_{ij} : *taux de transition du mode* i *à* j *pour le processus* $\varepsilon(t)$ *avec* $i, j \epsilon \{1,2,3,4\}$
- ${q^k}_{ij}$: *taux de transition du mode* i *à* j *pour le processus* $\varepsilon_k(t)$ *avec* $i, j \epsilon \{0,1\}$ *et* $k \epsilon \{1,2\}$
- c^+: *Coût d'inventaire*
- c^- : *Coût de pénurie*
- c_e: *Coût d'émissions des GES*
- c_{p1}: *Coût de production de la machine* $M1$
- c_{p2}: *Coût de production de la machine* $M2$
- ρ : *taux d'actualisation*
- L : *limite d'émissions des GES*
- θ_1: *taux d'émissions des GES de la machine* $M1$
- θ_2: *taux d'émissions des GES de la machine* $M2$

Ci-dessous quelques spécifications du système et de ses paramètres :

- Le coût de fabrication c_{p1} est supérieur au coût de refabrication c_{p2} (i.e., $c_{p1} > c_{p2}$). La machine M2 est donc plus rentable que M1.
- Étant donné que les deux machines produisent le même produit, elles supportent des coûts de stockage et de pénurie identiques, ainsi que des coûts d'émission similaires.
- En tant que ressource principale du système de production, la machine de fabrication (M1) possède un taux de production maximal ${U^1}_{max}$ supérieur à celui de la machine de refabrication ${U^2}_{max}$ (i.e., ${U^1}_{max} > {U^2}_{max}$).

Le système est confronté à un taux de demande constant d, et l'objectif est de minimiser les coûts totaux, à savoir :

- Coût d'inventaire : $c^+.x^+$
- Coût de pénurie : $c^-.x^-$
- Coût de production :

$$c_{p1}.u_1(t).\varepsilon_1(t) + c_{p2}.u_2(t).\varepsilon_2(t)$$

Coût d'émissions, comme définie dans [Ben-Salem et al., 2015] (appliquée lorsque les émissions dépassent un seuil L) :

$$c_e * \max(0, e(t_{T_i}) - L) \; ; i = 0, \ldots\ldots, \infty$$

Le coût total actualisé est :

$$J(\varepsilon, x, e) = E\left\{ \begin{matrix} \int_0^\infty e^{-\rho t} g(.)dt + \sum_{i=1}^{\infty} c_e * max(0, e(t_{Ti}) - L) \\ | \, x(0) = x_0, e(t_{0T_i}) = 0 \, , \varepsilon(0) = \varepsilon \end{matrix} \right\} \quad (1)$$

Et la fonction valeur est donné par :

$$v(\varepsilon, x, e) = inf_{((u_1, u_2) \epsilon A(\varepsilon))} J(\varepsilon, x, e) \quad (2)$$

3.1 Conditions d'optimum :

En utilisant la programmation dynamique stochastique, nous avons développé des équations HJB basées sur les travaux précédemment réalisés dans
[Afshar-Bakeshloo et al., 2018 ; Ouaret et al., 2019]et bien d'autres.
À l'optimalité, l'équation (1) peut être exprimée comme suit :

$$\rho v(\varepsilon, x, e) = min_{(u_1, u_2) \epsilon A(\varepsilon)} \{ g(\varepsilon, x, e) + \frac{\partial v(\varepsilon, x, e)}{\partial x}.(u_1 + u_2 - d) + \frac{\partial v(\varepsilon, x, e)}{\partial e}.(\theta_1.u_1 + \theta_1.u_2) + \sum_{\beta \epsilon B} q_{\alpha\beta}.v(\beta, x, e) + \sum_{i=1}^{\infty} c_e * max(0, e(t_{Ti}) - L) \} \quad (3)$$

L'adoption d'une demande constante forme une première étape clé dans la conception d'une politique de contrôle pour les systèmes hybrides avec contraintes environnementales. Cette démarche permet de construire les fondements théoriques avant d'aborder des complications supplémentaires comme la variabilité de la demande. Cette simplification favorise l'analyse des interactions entre niveaux de stock, émissions et défaillances des machines, établissant ainsi une base méthodologique pour l'extension future à des demandes variables.

4 RESOLUTION NUMERIQUE ET RESULTATS

Il convient de noter que les valeurs paramétriques choisies pour cet exemple ($\theta_1 = \theta_2 = 1.5$, d = 5, etc.) ne représentent pas des limitations du modèle théorique développé. Ces configurations numériques ont été sélectionnées uniquement pour faciliter l'illustration et l'analyse des résultats. Notre approche demeure applicable à toute configuration paramétrique, s'adaptant ainsi aux spécificités de différents contextes industriels.
En utilisant la programmation dynamique stochastique, la politique optimale a été dérivée et validée par une résolution numérique selon l'approche de [Kushner et Dupuis, 1992]. Dans le tableau 2 ci-dessous, nous présentons les données (paramètres et coûts) utilisées pour la résolution des équations HJB à l'aide de l'approche numérique.

Tableau 2 Données de l'exemple numérique – Coûts et Paramètres du modèle

c^+	c_e	c^-	c_{man}	c_{rem}	${q^1}_{10}$	${q^1}_{01}$	${q^2}_{10}$	${q^2}_{01}$	d	θ_1	θ_2
1	30	350	100	50	0,01	0,16	0,12	0,16	5	1.5	1.5
L	ρ	x_{inf}	x_{sup}	e_{inf}	e_{sup}	h_x	h_e	${U^1}_{max}$	${U^2}_{max}$		
150	0,1	-10	200	0	210	2.5	2.5	3.5	2.5		

Les principaux résultats incluent :

4.1 Fonction valeur au mode 1 :

La figure 2 présente la fonction de valeur correspondante pour le mode 1, dans lequel les deux machines sont pleinement

opérationnelles. Cette fonction de valeur représente le coût optimal espéré au fil du temps, compte tenu du niveau actuel des stocks et des émissions de GES. L'axe horizontal des x représente le niveau des stocks, l'axe des y représente le niveau des émissions de GES et l'axe vertical (axe des z) correspond à la fonction de valeur.

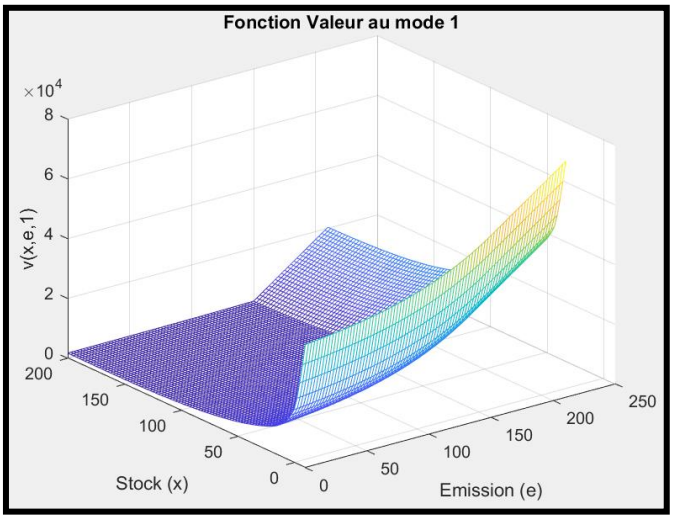


Figure 2 Fonction valeur au Mode 1

Lorsque le système maintient un niveau de stock élevé, il bénéficie d'une réserve qui lui permet de répondre à la demande future sans avoir besoin d'une production immédiate. Ce tampon réduit l'urgence d'augmenter la production, ce qui diminue les coûts associés tels que les frais d'exploitation et la consommation d'énergie. En outre, des niveaux de stock élevés permettent au système d'éviter les coûts d'arriéré ou de pénurie qui peuvent survenir lorsque la demande des clients dépasse le stock disponible. En minimisant ces coûts de pénalité, la fonction de valeur globale, qui représente le coût total attendu, diminue. En outre, avec des stocks suffisants, le système gagne en flexibilité dans ses décisions de production, ce qui lui permet d'optimiser entre la fabrication et la refabrication en fonction de la rentabilité et des taux d'émission. Cette flexibilité opérationnelle, ainsi que la possibilité de passer d'une machine à l'autre, contribue à réduire le coût total prévu en permettant au système d'optimiser les taux de production et de minimiser les émissions.

Inversement, lorsque les niveaux de stocks sont faibles, le système subit une pression accrue pour produire davantage afin de répondre à la demande et d'éviter les coûts liés à l'arriéré. Cette urgence peut se traduire par des taux de production plus élevés, ce qui augmente souvent les émissions de GES, surtout lorsque les deux machines fonctionnent à leur capacité maximale. Dans ces conditions, le système dispose également de moins d'options pour équilibrer production et émissions, ce qui oblige parfois à recourir à la machine de fabrication (M1), plus coûteuse en termes de coûts de production. En revanche, lorsque les stocks sont plus importants, le système peut ralentir la production et prioriser la machine la plus efficace (M2), réduisant ainsi les coûts liés à la production. Étant donné que la réduction et le contrôle des émissions de GES constituent un objectif central, la sensibilité aux coûts d'émission se révèle plus prononcée lorsque l'inventaire est faible, en particulier dès que le niveau d'émissions produites dépasse la limite *L* fixée par les autorités compétentes.

Dans ce système, le coût d'inventaire est relativement faible par rapport à des éléments plus importants, tels que les pénalités de retard, les coûts de production et les émissions de gaz à effet de serre. En outre, le maintien de niveaux de stocks plus élevés offre une flexibilité essentielle qui permet d'optimiser la production et les émissions, ce qui a un impact plus important sur la fonction de valeur. Par conséquent, le coût d'inventaire joue un rôle mineur dans l'influence de la fonction de valeur globale. Toutefois, nous ne pouvons pas maintenir indéfiniment des niveaux de stocks élevés, car cela entraînerait une escalade des coûts d'inventaire. Pour équilibrer cette situation, un niveau de couverture sera défini afin d'optimiser les stocks, de garantir la flexibilité tout en contrôlant les coûts d'inventaire. L'impact de ces coûts deviendra plus évident lorsque nous présenterons la politique de contrôle pour les deux machines. Dans la sous-section suivante, nous présentons le taux de production des deux machines pour chaque paire de variables d'état (x, e) .

4.2 Taux de production au mode 1 :

Les figures 3,4,5 et 6 illustrent le comportement du taux de production de la machine de fabrication M1 et de la machine de refabrication M2 dans le cadre d'une politique de contrôle caractérisée par une « politique de points de couverture ». Cette politique ajuste dynamiquement les niveaux de couverture, dénommés $Z_1(e)$ et $Z_2(e)$, en réponse aux variations des niveaux d'émission.

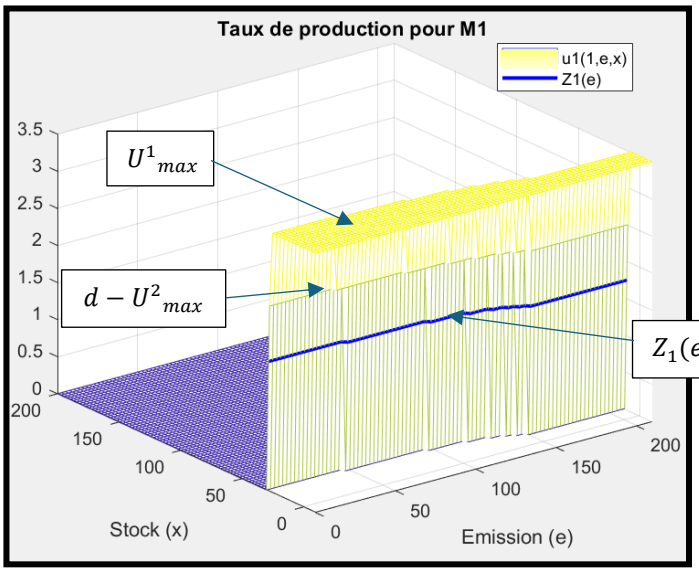


Figure 3 Taux de production pour M1-Vue 3D

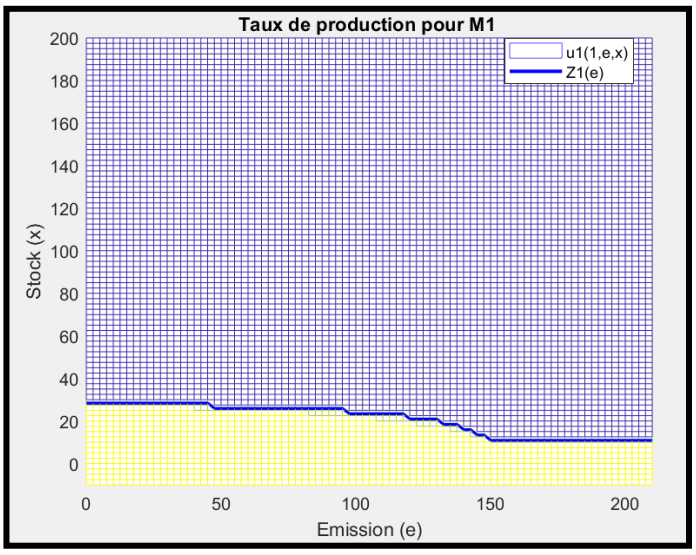


Figure 4 Taux de production pour M1-Vue 2D

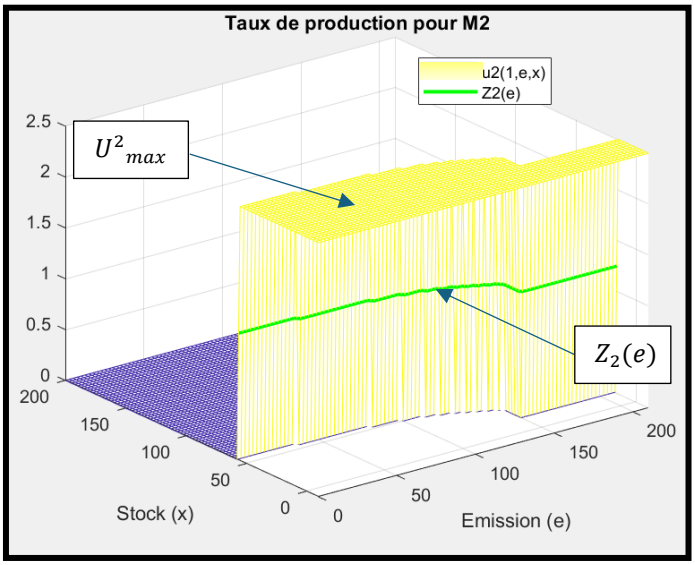


Figure 5 Taux de production pour M2 – Vue 3D

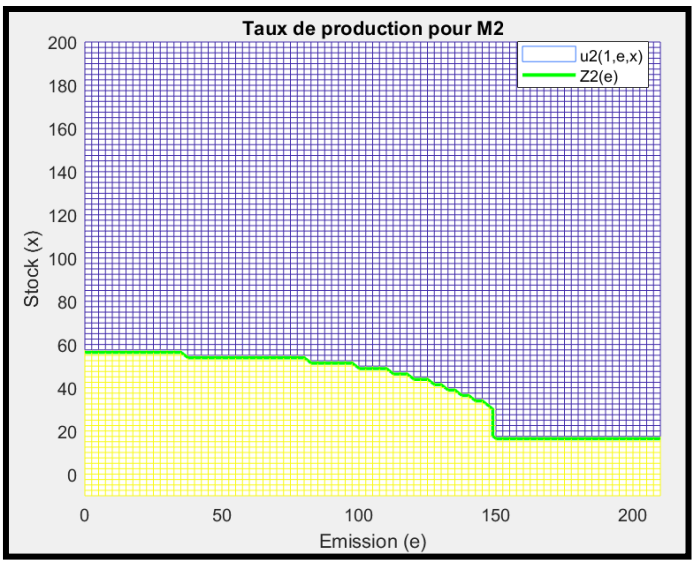


Figure 6 Taux de production pour M2 – Vue 2D

Plus précisément, $Z_1(e)$ varie en fonction de l'état des émissions du système, ce qui permet d'optimiser les taux de production tout en respectant les contraintes environnementales. Cependant, lorsque le niveau d'émission e dépasse un seuil critique L, le niveau de couverture $Z_1(e)$ devient constant, ce qui indique un point de saturation dans la réactivité de la politique.

De même, $Z_2(e)$ s'ajuste en fonction des niveaux d'émission, reflétant ainsi l'adaptabilité de la machine aux conditions environnementales changeantes. Contrairement à la machine de fabrication, la machine de refabrication est moins coûteuse en termes de coûts de production, ce qui entraîne un $Z_2(e)$ supérieur à $Z_1(e)$, permettant au système de tirer parti de cet avantage lorsque les niveaux d'émissions le permettent. $Z_2(e)$ diminue progressivement à mesure que les émissions augmentent, jusqu'à ce que le niveau e dépasse le seuil critique L. Au-delà de ce point, $Z_2(e)$ se stabilise, garantissant que le taux de production s'aligne sur les contraintes environnementales. Ce comportement souligne la capacité de la politique de contrôle à équilibrer les performances opérationnelles et les objectifs de durabilité.

4.3 Structure de la politique de contrôle :

À partir des résultats numériques et de l'analyse graphique présentés précédemment, nous définissons une politique de contrôle de production où les seuils d'inventaire permettent une adaptation dynamique des taux de fabrication et de refabrication.

- $e \leq L$:

$$u_1(1,e,x) = \begin{cases} U^1{}_{max} & si\ x \leq Z_1(e)\ et\ \alpha_1(t) = 1 \\ d - U^2{}_{max} & si\ x = Z_1(e)\ et\ \alpha_1(t) = 1 \\ 0 & si\ x > Z_1(e)\ ou\ \alpha_1(t) = 0 \end{cases}$$

$$u_2(1,e,x) = \begin{cases} U^2{}_{max} & si\ x \leq Z_2(e)\ et\ \alpha_2(t) = 1 \\ 0 & si\ x > Z_2(e)\ ou\ \alpha_2(t) = 0 \end{cases}$$

(4)

- $e > L$:

$$u_1(1,e,x) = \begin{cases} U^1{}_{max} & si\ x \leq Z_3\ et\ \alpha_1(t) = 1 \\ d - U^2{}_{max} & si\ x = Z_3\ et\ \alpha_1(t) = 1 \\ 0 & si\ x > Z_3\ ou\ \alpha_1(t) = 0 \end{cases}$$

$$u(2,x,e) = \begin{cases} U^2{}_{max} & si\ x \leq Z_4\ et\ \alpha_2(t) = 1 \\ 0 & si\ x > Z_4\ \ ou\ \ \alpha_2(t) = 0 \end{cases}$$

Le taux de production des machines de fabrication (M1) et de refabrication (M2) est ajusté dynamiquement en fonction du niveau d'émissions e et de l'état d'inventaire x. Lorsque $e \leq L$, la machine de fabrication M1 fonctionne à son taux maximal $U^1{}_{max}$ tant que $x \leq Z_1(e)$ et que la machine est disponible. Si l'inventaire atteint $Z_1(e)$, la production est ajustée à $d - U^2{}_{max}$ pour soutenir la machine de refabrication afin d'atteindre le taux de demande. Au-delà de ce seuil ou en cas d'indisponibilité, M1 cesse de produire. De son côté, la machine de refabrication M2 suit la même logique et fonctionne à son taux maximal $U^2{}_{max}$ lorsque $x \leq Z_2(e)$, mais s'arrête dès que $x > Z_2(e)$ ou si elle est indisponible. Lorsque $e > L$, les seuils deviennent constants, avec Z_3 et Z_4 fixés. La machine M1 fonctionne à $U^1{}_{max}$ tant que $x \leq Z_3$ et ajuste sa production à $d - U^2{}_{max}$ lorsque $x = Z_3$. Elle cesse de produire lorsque $x > Z_3$ ou si elle est indisponible. M2 suit un comportement similaire, fonctionnant à $U^2{}_{max}$ lorsque $x \leq Z_4$et s'arrêtant dès que $si\ x > Z_4$ ou en cas d'indisponibilité. Cette politique garantit ainsi une régulation efficace de la production en fonction des niveaux d'émissions et des stocks tout en maintenant une gestion optimisée des coûts de production et d'émissions.

4.4 Intégration des machines de fabrication et de refabrication :

Nous allons illustrer comment l'intégration et la collaboration entre les machines M1 et M2 pourraient être réalisées et comment cela améliore la politique de production du contrôle conjoint. Les figures 7 et 8 ci-dessous illustrent la somme des taux de production des machines M1 et M2 :

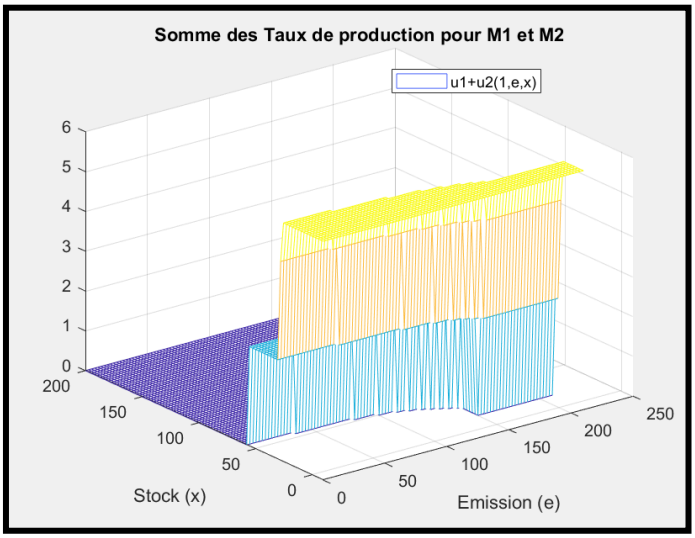


Figure 7 Somme des taux de production pour M1 & M2 au mode 1- vue 3D

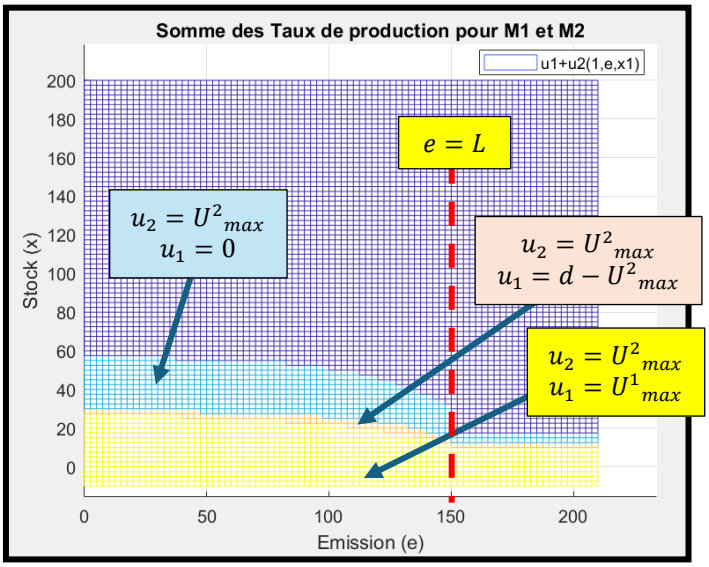


Figure 8 Somme des taux de production pour M1 & M2 au mode 1- vue 2D

D'après les figures 7 et 8, plusieurs zones peuvent être distinguées : (1) une zone où seule la machine de refabrication est en fonctionnement (zone bleue), ce qui permet de réduire les coûts de production et les émissions lorsque les niveaux de stock et les contraintes environnementales le permettent ; (2) une zone où les deux machines fonctionnent simultanément à leur capacité maximale (zone jaune), afin de constituer un stock et d'éviter les coûts de pénurie. Par ailleurs, dans la figure 8, on peut identifier une zone supplémentaire (zone orange), où la somme des taux de production des deux machines correspond exactement au taux de demande des clients d. Cette configuration illustre la coordination entre les deux machines pour répondre efficacement à la demande.

4.5 Taux de production en mode 2 et 3 :

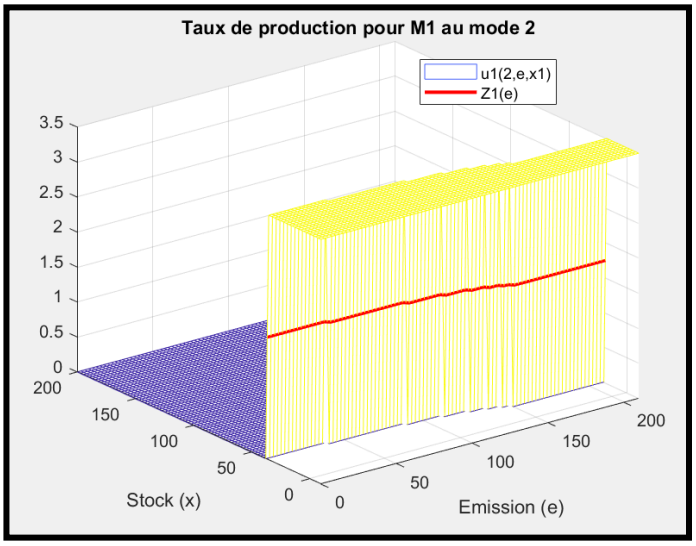


Figure 9 Taux de production pour M1 au mode 2

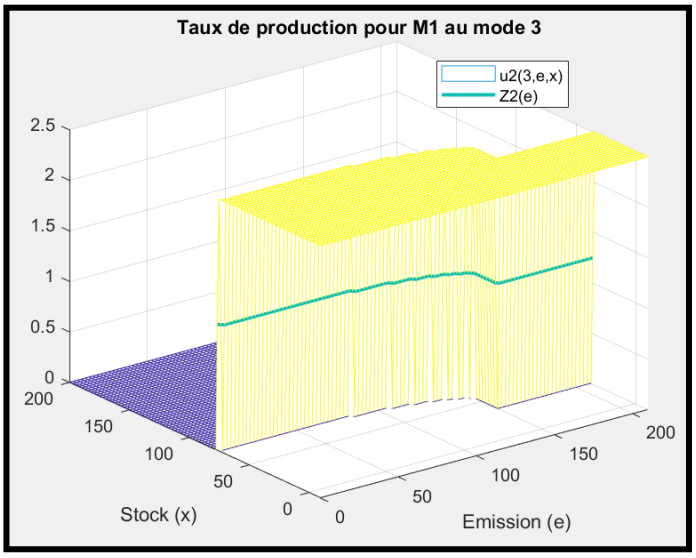


Figure 10 Taux de production pour M2 au mode 3

Nous observons que le taux de production de la machine de fabrication suit un schéma similaire en mode 2, où la machine de refabrication est indisponible. Dans ce cas, le niveau de stock $Z_1(e)$ est plus élevé en mode 2 par rapport au mode 1. Cela s'explique par le besoin du système de maintenir une réserve de stock plus importante afin de compenser l'indisponibilité de la machine de refabrication et de se prémunir contre d'éventuelles pénuries. À mesure que le niveau d'émissions augmente, le niveau de stock $Z_1(e)$ diminue progressivement jusqu'à atteindre une valeur constante lorsque les émissions dépassent le seuil L.

Une observation similaire s'applique à la machine de refabrication en mode 3, lorsque la machine de fabrication est indisponible. Dans ce cas, le niveau de stock $Z_2(e)$ est plus élevé que dans les modes 2 et 1. Cela s'explique par l'adaptation du système à l'indisponibilité de la machine de fabrication, combinée à la fiabilité plus faible de la machine de refabrication. Le système augmente ainsi les niveaux de stock afin d'assurer la continuité de la production et de limiter les risques de pénurie, en tenant compte de la fiabilité réduite du processus de refabrication.

5 CONCLUSION

Dans cette étude, nous avons proposé une politique de point de couverture environnemental adaptée aux systèmes hybrides de fabrication et de refabrication sous incertitude. Fondée sur la théorie du contrôle optimal stochastique, cette approche permet de dynamiser les décisions de production en tenant compte des niveaux d'inventaire, des contraintes environnementales et de la disponibilité des machines.

Les résultats obtenus à travers la résolution numérique montrent que la politique permet d'équilibrer efficacement les coûts économiques et environnementaux. Plus précisément, cette politique :

- Minimise les coûts d'inventaire, de rupture, de production et d'émissions, tout en garantissant une exploitation fiable du système ;
- Adapte dynamiquement les taux de production en fonction des variations des seuils d'inventaire et des niveaux d'émissions ;
- Révèle différentes zones de contrôle, où les décisions de production varient selon la capacité des machines et les contraintes environnementales.

L'analyse de sensibilité permettra de mettre en évidence l'impact des taux, des différents coûts et paramètres sur la performance du système, confirmant ainsi la robustesse de la politique proposée.

En termes d'applications, ces résultats fournissent des recommandations pratiques pour la mise en œuvre de stratégies de production plus durables. Des travaux futurs permettront d'étendre ce modèle dans plusieurs directions prometteuses. L'intégration de l'optimisation par simulation ou l'apprentissage par renforcement affinera davantage les stratégies de contrôle. L'incorporation de la variabilité de la demande, absente du modèle actuel, permettra d'adapter dynamiquement les seuils d'inventaire et les décisions de production. Parallèlement, plusieurs améliorations méthodologiques enrichiront la portée pratique du modèle : l'intégration de la variabilité de la qualité des produits retournés, facteur crucial pour l'efficacité de la refabrication, et le développement d'une analyse économique complète incluant les investissements initiaux nécessaires. Enfin, la prise en compte de stratégies de maintenance corrective et préventive optimisera la disponibilité des machines et réduira les interruptions non planifiées.

6 REFERENCES

Afshar-Bakeshloo, M., Bozorgi-Amiri, A., Sajadi, S. M., & Jolai, F. (2018). A multi-objective Environmental Hedging Point Policy with customer satisfaction criteria. *Journal of Cleaner Production*, *179*, 478–494. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.041

Akella, R., & Kumar, P. (1986). Optimal control of production rate in a failure prone manufacturing system. *IEEE Transactions on Automatic Control*, *31*(2), 116–126. https://doi.org/10.1109/TAC.1986.1104206

Aminipour, A., Bahroun, Z., & Hariga, M. (2021). Cyclic manufacturing and remanufacturing in a closed-loop supply chain. *Sustainable Production and Consumption*, *25*, 43–59. https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.08.002

Assid, M., Gharbi, A., & Hajji, A. (2019). Production and setup control policy for unreliable hybrid manufacturing-remanufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, *50*, 103–118. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.12.004

Assid, M., Gharbi, A., & Hajji, A. (2023). Control policies of changeable manufacturing-remanufacturing systems using two failure-prone production facilities. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *125*(1–2), 279–297. https://doi.org/10.1007/s00170-022-10664-8

Ben-Salem, A., Gharbi, A., & Hajji, A. (2015). An Environmental Hedging Point Policy to control production rate and emissions in unreliable manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, *53*(2), 435–450. https://doi.org/10.1080/00207543.2014.946161

Chen, Y., Li, B., Zhang, G., & Bai, Q. (2020). Quantity and collection decisions of the remanufacturing enterprise under both the take-back and carbon emission capacity regulations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *141*, 102032. https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102032

Entezaminia, A., Gharbi, A., & Ouhimmou, M. (2020). Environmental hedging point policies for collaborative unreliable manufacturing systems with variant emitting level technologies. *Journal of Cleaner Production*, *250*, 119539. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119539

Entezaminia, A., Gharbi, A., & Ouhimmou, M. (2021). A joint production and carbon trading policy for unreliable manufacturing systems under cap-and-trade regulation. *Journal of Cleaner Production*, *293*, 125973. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125973

Farahani, S., Otieno, W., & Omwando, T. (2020). The optimal disposition policy for remanufacturing systems with variable quality returns. *Computers & Industrial Engineering*, *140*, 106218. https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106218

Gong, X., & Zhou, S. X. (2013). Optimal Production Planning with Emissions Trading. *Operations Research*, *61*(4), 908–924. https://doi.org/10.1287/opre.2013.1189

Kenne, J. P., & Gharbi, A. (2000). Production planning problem in manufacturing systems with general failure and repair time distributions. *Production Planning & Control*, *11*(6), 581–588. https://doi.org/10.1080/095372800414142

Kenné, J.-P., Gharbi, A., Takengny, A. L. K., & Assid, M. (2024). Optimal Control Policy of Unreliable Production Systems Generating Greenhouse Gas Emission. *Sustainability*, *16*(13), 5760. https://doi.org/10.3390/su16135760

Kushner, H. J., & Dupuis, P. (1992). *Numerical Methods for Stochastic Control Problems in Continuous Time* (Second Edition). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0007-6

Liao, H., & Li, L. (2021). Environmental sustainability EOQ model for closed-loop supply chain under market uncertainty: A case study of printer remanufacturing. *Computers & Industrial Engineering*, *151*, 106525. https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106525

Liu, Z., Chen, J., & Diallo, C. (2018). Optimal production and pricing strategies for a remanufacturing firm. *International Journal of Production Economics*, *204*, 290–315. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.07.015

Ouaret, S., Kenné, J.-P., & Gharbi, A. (2019). Production and replacement planning of a deteriorating remanufacturing system in a closed-loop configuration. *Journal of Manufacturing Systems*, *53*, 234–248. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.09.006

Sundin, E., & Lee, H. M. (2012). In what way is remanufacturing good for the environment? In M. Matsumoto, Y. Umeda, K. Masui, & S. Fukushige (Eds.), *Design for Innovative Value Towards a Sustainable Society* (pp. 552–557). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-3010-6_106

Turki, S., Didukh, S., Sauvey, C., & Rezg, N. (2017). Optimization and Analysis of a Manufacturing–Remanufacturing–Transport–Warehousing System within a Closed-Loop Supply Chain. *Sustainability*, *9*(4), 561. https://doi.org/10.3390/su9040561

Turki, S., Sauvey, C., & Rezg, N. (2018). Modelling and optimization of a manufacturing/remanufacturing system with storage facility under carbon cap and trade policy. *Journal of Cleaner Production*, *193*, 441–458.https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.057

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Vers une collecte intelligente des déchets : modèle analytique piloté par les données IoT

MOHAMED ARBI ROKH[1], NADIA BAHRIA[1,2], RIM LARBI[3], AMIN CHAABANE[3]

[1] CRI, ÉCOLE POLYTECHNIQUE INTERNATIONALE PRIVEE DE TUNIS
RUE DU LAC D'ANNECY, TUNIS 1053 – TUNISIE
UNIVERSITE DE TUNIS EL MANAR, OASIS
MOHAMED.ROKH80@GMAIL.COM

[2]OASIS, ÉCOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE TUNIS, UNIVERSITE DE TUNIS EL MANAR
ÉCOLE NATIONALE SUPERIEURE D'INGENIEURS DE TUNIS
BP 37, LE BELVEDERE 1002 TUNIS - TUNISIE
NADIA.BAHRIA@ENIT.UTM.TN

[3]ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPERIEURE (ÉTS)
1100 RUE NOTRE DAME OUEST, QC H3C 1K3 MONTREAL, CANADA
RIM.LARBI@ETSMTL.CA
AMINE.CHAABANE@ETSMTL.CA

***Résumé* – Dans un cadre de plus en plus intelligent, la gestion des déchets intégrant les nouvelles technologies 4.0 représente un défi majeur. L'Internet des objets (IoT) offre des solutions innovantes pour optimiser cette gestion et garantir son efficacité. Cet article explore l'intégration des technologies IoT dans la gestion des déchets pour répondre aux défis posés par une urbanisation croissante. Face à l'augmentation massive de la production de déchets et aux limites des approches traditionnelles reposant sur des itinéraires fixes, l'étude propose une méthode basée sur les données (*data-driven*) qui combine des capteurs mesurant en temps réel les niveaux de remplissage des conteneurs avec un algorithme génétique enrichi par la méthode du plus proche voisin. Cette approche permet de générer dynamiquement des itinéraires optimisés, évitant les déplacements inutiles et réduisant ainsi les coûts opérationnels et les émissions de CO_2 , avec des améliorations allant jusqu'à 60 % par rapport aux méthodes classiques. Les résultats expérimentaux démontrent une utilisation plus efficace des ressources, une meilleure allocation des véhicules et une réduction significative du risque de débordement, ouvrant la voie à des systèmes de collecte des déchets plus durables et adaptatifs dans un contexte urbain en constante évolution.**

***Mots clés* – Collecte des déchets, IoT, Bac intelligent, Tournées de véhicules**

***Abstract* – Waste management leveraging Industry 4.0 technologies presents a significant challenge in an increasingly intelligent urban environment. The Internet of Things (IoT) offers innovative solutions to optimize waste collection processes and enhance operational efficiency. This study investigates integrating IoT technologies into waste management to address challenges arising from rapid urbanization and growing waste volumes. Traditional collection methods based on fixed routes often lead to inefficiencies in resource utilization and environmental impact. To overcome these limitations, this research proposes a data-driven approach that combines real-time container fill level monitoring via IoT sensors with a genetic algorithm enhanced by the nearest neighbor method. This approach dynamically optimizes collection routes, minimizing unnecessary trips, reducing operational costs, and lowering CO_2 emissions—achieving improvements of up to 60% compared to conventional methods. Experimental results demonstrate more efficient resource utilization, improved vehicle allocation, and a significant reduction in overflow risks, paving the way for more adaptive and sustainable waste collection systems in evolving urban landscapes**

***Keywords* – Waste collection, IoT, Smart bin, Vehicle Routing**

1 INTRODUCTION

Actuellement, 4,2 milliards de personnes vivent dans des zones urbaines, soit environ 55 % de la population mondiale, un chiffre qui devrait atteindre 70 % d'ici 2050 (Moreno-Monroy et al., 2021). Cette urbanisation rapide exerce une pression croissante sur les villes, entraînant des crises de gestion dans divers domaines. Face à ces défis, les autorités locales et les urbanistes doivent adopter des approches de gestion innovantes pour surmonter les problèmes sociaux et environnementaux et promouvoir des villes durables. Parmi les enjeux majeurs, la gestion des déchets se distingue comme un pilier fondamental pour maintenir la propreté urbaine, protéger l'environnement

et préserver la santé publique. Cela implique non seulement des efforts en collecte et traitement des déchets, mais également l'optimisation des ressources logistiques, la satisfaction des citoyens et la réduction des coûts opérationnels. La production de déchets solides municipaux a considérablement augmenté ces dernières années, atteignant 2,01 milliards de tonnes par an, un chiffre qui pourrait croître de 65 % d'ici 2050 (Cheela et al., 2021). Cette augmentation est alimentée par divers facteurs, notamment la croissance démographique, l'urbanisation, le développement économique et l'évolution des habitudes de consommation. Toutefois, les systèmes traditionnels de gestion des déchets, comme le dépôt en décharges, posent des défis environnementaux considérables, tels que la pollution des sols, des océans et de l'air. En parallèle, le financement de ces systèmes demeure un défi critique, les coûts varient significativement entre les pays à faible revenu et ceux à revenu élevé.

Dans les approches de gestion traditionnelles, le problème de la collecte des déchets est souvent traité comme un problème de routage de véhicules (VRP), où l'objectif est de minimiser les coûts ou la distance parcourue en respectant diverses contraintes. Les méthodes classiques de résolution, telles que les heuristiques, peuvent fournir des solutions satisfaisantes. Cependant, l'usage de métaheuristiques pour résoudre le problème de VRP s'est avéré être l'une des techniques les plus prometteuses pour cette famille de problèmes (Braekers et al., 2016). Les métaheuristiques effectuent une recherche plus exhaustive de l'espace de solution que les heuristiques classiques, et bien qu'elles puissent produire des solutions de haute qualité, elles nécessitent généralement plus de temps et d'efforts de calcul (Braekers et al., 2016). Plusieurs métaheuristiques, notamment les algorithmes génétiques, ont démontré une grande efficacité dans la littérature (Kinobe et al., 2015; Lozano et al., 2018; Martikkala et al., 2023). Toutefois, les approches de gestion traditionnelles de collecte ne tiennent pas toujours compte de l'état des niveaux de remplissage des bacs de récupération, ce qui conduit à des collectes inefficaces (visite de bacs vides ou risque de débordement).

L'intégration de technologies comme l'Internet des Objets (IoT) offre des solutions prometteuses pour transformer les processus traditionnels en systèmes intelligents et repenser l'approche de gestion. Ces technologies permettent une gestion proactive basée sur des données en temps réel, favorisant une meilleure allocation des ressources, des décisions éclairées et une réduction des coûts opérationnels. Par exemple, l'installation de capteurs dans les conteneurs à déchets permet de collecter en temps réel des informations sur leurs niveaux de remplissage ou sur leurs volumes. Ces informations, intégrées dans des modèles d'optimisation, offrent la possibilité de concevoir diverses stratégies de gestion de la collecte des déchets. Par exemple, une approche consiste à déclencher la collecte uniquement lorsque le niveau de remplissage d'un conteneur dépasse un seuil prédéfini, une autre combine la collecte des conteneurs saturés avec celle des conteneurs partiellement remplis afin d'optimiser l'utilisation des ressources, et une approche proactive s'appuie sur des modèles prédictifs intégrant des variables contextuelles telles que les variations saisonnières, les comportements de consommation et les conditions météorologiques.
Dans ce contexte, cet article explore comment les technologies IoT peuvent moderniser l'approche de gestion des déchets et contribuer à la durabilité urbaine. Plus spécifiquement, les questions de recherche auxquelles nous souhaitons répondre sont les suivantes :

- Comment l'intégration des technologies IoT peut-elle transformer l'approche de gestion de la collecte des déchets ?
- Dans quelle mesure l'approche de gestion data-driven, intégrant les technologies IoT, permet-elle d'améliorer l'efficacité opérationnelle de la collecte des déchets par rapport aux méthodes traditionnelles ?

Pour répondre à ces questions, nous étendons le modèle de collecte traditionnel en développant une approche de gestion data-driven. Elle combine des modèles mathématiques de VRP et des données en temps réel issus des capteurs IoT. Cette méthode permet de concevoir des itinéraires dynamiques qui évitent la collecte de conteneurs vides tout en prévenant les débordements. Sachant que la quantité de déchets à collecter peut-être inférieure à la capacité du véhicule, nous intégrons également une heuristique du plus proche voisin pour regrouper les conteneurs voisins et optimiser l'utilisation des ressources. Ainsi, la contribution de cet article réside dans l'exploration et l'analyse comparative, évaluant un modèle traditionnel basé sur des itinéraires statiques face à deux modèles dynamiques, l'un fondé sur le niveau de remplissage et l'autre sur une approche de regroupement par voisinage, afin de mesurer l'impact opérationnel et environnemental d'un système de collecte intelligent.

Le reste de cet article est organisé comme suit. Un aperçu de la littérature est présenté dans la Section 2. Dans la Section 3, le problème étudié est décrit et formulé mathématiquement. La Section 4 décrit l'algorithme métaheuristique proposé. Les expériences numériques sont présentées et analysées dans la Section 5. Enfin, la Section 6 résume les principales conclusions, les limites et les perspectives futures de la recherche.

2 REVUE DE LA LITTERATURE

L'intérêt croissant pour la gestion des déchets solides municipaux (DSM) sous une perspective environnementale s'est intensifié ces dernières années. Les DSM, en raison de leur impact environnemental et de leur potentiel de valorisation via l'économie circulaire, représentent un défi stratégique qui nécessite l'optimisation de l'ensemble de leur chaîne de traitement – de la génération à l'élimination – au sein d'un système intégré (Mohammadi et al., 2019).
De nombreux travaux ont exploré le problème de routage. La conception d'itinéraires optimaux pour la collecte des déchets – connue sous le nom de Waste Collection Vehicle Routing Problem (WCVRP) – est un problème NP-difficile qui a fait l'objet d'une vaste littérature. Les approches exactes, basées sur la programmation mathématique, permettent de résoudre de petites instances, mais leur temps de calcul augmente de manière exponentielle (Omara et al., 2018). Pour des réseaux de grande taille, les méthodes heuristiques et métaheuristiques sont privilégiées, car elles offrent des solutions satisfaisantes dans des temps d'exécution raisonnables. Parmi ces méthodes, les heuristiques par insertion, telles que le plus proche voisin, sont souvent utilisées pour prolonger une route de manière itérative (Faccio et al., 2011); (Heijnen, 2019). Par ailleurs, des métaheuristiques telles que les colonies de fourmis, les algorithmes génétiques, l'optimisation par essaim de particules, le recuit simulé ou la recherche tabou ont été largement étudiées (Amal et al., 2018 ; Babaee Tirkolaee et al., 2019 ; Dereci & Karabekmez, 2022 ; Hannan et al., 2018 ; Karadimas et al., 2005 ; Strand et al., 2020 ; Wu et al., 2020).

Ces approches se concentrent principalement sur la minimisation des distances, des temps de parcours et des coûts, tout en prenant en compte des contraintes telles que la capacité des véhicules, la durée des tournées et les fenêtres temporelles (Kinobe et al., 2015 ; Son, 2014). De nombreux travaux adoptent également une approche qui regroupe les conteneurs à l'aide d'algorithmes de clustering comme le k-means (Anagnostopoulos et al., 2015 ; Hua et al., 2016 ; Kim et al., 2025) .

Parallèlement, l'intégration des technologies IoT a récemment attiré l'attention des chercheurs. L'utilisation de capteurs intelligents permet de collecter en temps réel des données sur les niveaux de remplissage des conteneurs, offrant ainsi la possibilité d'adapter dynamiquement les itinéraires de collecte. Plusieurs travaux se sont focalisés au développement de ces capteurs sans proposer de modèles mathématiques pour l'optimisation de la collecte (Ferrer & Alba, 2019; Henaien et al., 2024; Lozano et al., 2018; Mallikarjuna Raju et al., 2024). Ces données collectées sont ensuite transmises aux décideurs qui gèrent dynamiquement la collecte en sélectionnant les conteneurs à vider en fonction de leurs niveaux de remplissage. Le problème de routage pour la collecte intelligente des déchets (SWCRP) a été introduit pour la première fois par (Ramos et al., 2018) afin de planifier des itinéraires de collecte intelligente prenant en compte des informations en temps réel sur les niveaux de remplissage des conteneurs, obtenues grâce à des capteurs volumiques installés à l'intérieur de ces derniers. Contrairement à une gestion statique, où les mêmes itinéraires prédéfinis sont effectués pour visiter tous les conteneurs indépendamment de leur niveau de remplissage, les itinéraires intelligents se caractérisent par une gestion dynamique, au fur et à mesure que de nouvelles informations sur le niveau de remplissage des déchets sont mises à jour. Ces itinéraires sont définis par le biais d'un modèle mathématique. Le problème a été modélisé et résolu comme un problème de routage de véhicules avec profits (VRPP). (Hrabec et al., 2019) se sont intéressés à la minimisation des coûts de transport et à la prise de décision anticipée pour la collecte des conteneurs sur le point d'être remplis dans des problèmes de routage dynamique au sein des systèmes de gestion des déchets, grâce à l'utilisation de capteurs. (Jorge et al., 2022) ont conçu un cadre permettant d'envisager des itinéraires dynamiques pour les jours suivants dans un système de collecte intelligente des déchets, en s'appuyant sur des informations en temps réel sur le niveau de remplissage des conteneurs. Un algorithme métaheuristique hybride a d'abord été développé pour déterminer le jour de collecte ainsi que les conteneurs à visiter, puis un algorithme combinant recuit simulé et recherche de voisinage a été utilisé afin d'identifier un ensemble de conteneurs rentables. (Akbarpour et al., 2021) ont développé un modèle mathématique pour la collecte des déchets dans les villes intelligentes. Ils ont étudié une approche métaheuristique modifiée afin d'optimiser leurs variables décisionnelles et leurs procédures de collecte. L'objectif de leur recherche était de réduire le coût total du transport tout en maximisant le revenu généré par la valeur ajoutée issue de la récupération des déchets. (Martikkala et al., 2023), proposent une optimisation dynamique des itinéraires pour les déchets textiles, utilisant l'IoT pour ajuster les tournées selon les besoins en temps réel, ce qui permet de réduire l'empreinte carbone et d'optimiser les coûts de collecte. Cette approche est similaire à celle décrite dans (Belhiah et al., 2024), où l'IoT permet d'optimiser les tournées de collecte des déchets non planifiés en fonction des niveaux de remplissage détectés. Ce système adaptatif permet de réagir rapidement aux variations de la quantité de déchets générés, tout en maximisant l'efficacité du réseau de collecte.

Parallèlement, afin d'identifier quels conteneurs faut-il collecter et quand, on retrouve diverses règles de déclenchement. Par exemple, certains auteurs considèrent un seuil minimum prédéfini (généralement entre 70 et 75 %) pour décider quels conteneurs collecter (Anagnostopoulos et al., 2015) ; (Ferrer & Alba, 2019; Ramos et al., 2018). D'autres travaux considèrent également des conteneurs qui n'ont pas encore atteint ce seuil si leur proximité par rapport aux routes existantes suggère qu'ils seront rapidement remplis (Christodoulou et al., 2016; Omara et al., 2018). Certains développent des stratégies de planification qui attribuent quotidiennement une « attractivité » aux conteneurs en vue de maximiser la quantité de déchets collectés sur un horizon glissant (Ramos et al., 2018), tandis que d'autres se basent sur des prévisions de débordement pour orienter la sélection (de Morais et al., 2024; Heijnen, 2019; Kim et al., 2025).

En résumé, une grande partie des recherches antérieures sur la gestion intelligente des déchets s'est concentrée sur la conception d'applications IoT innovantes basées sur des capteurs pour réduire les coûts opérationnels fixes et de transport ainsi que le temps de service. Jusqu'à présent, trop peu d'attention a été portée à l'impact environnemental et à la mise en place de méthodes heuristiques tenant compte des caractéristiques spécifiques du problème.

Dans ce contexte, le projet développé vise à surmonter ces limites en proposant une approche de gestion qui combine l'IoT avec un algorithme génétique pour optimiser en temps réel les itinéraires de collecte des déchets. L'intégration de la méthode du plus proche voisin (Nearest Neighbor) dans cet algorithme permet de traiter de manière plus dynamique et efficace les données en temps réel tout en améliorant les performances du système. Ce modèle permet ainsi de prendre en compte les informations issues des capteurs pour une gestion plus précise et réactive des itinéraires de collecte. En optimisant non seulement les trajets, mais aussi l'utilisation des ressources, ce modèle devrait contribuer à la réduction des coûts opérationnels, à la diminution des émissions de CO_2 et à une meilleure gestion des déchets. Cette approche permet d'améliorer la durabilité et l'adaptabilité des systèmes de gestion des déchets, tout en rendant les opérations plus écologiques et économiquement viables.

3 DESCRIPTION DE L'APPROCHE DE GESTION INTELLIGENTE POUR LA COLLECTE DES DECHETS

3.1 Description du modèle de gestion

La modélisation du processus de collecte des déchets avec l'IoT vise à optimiser les opérations en réduisant les coûts de déplacement, les émissions de CO_2 et les inefficacités, telles que les visites inutiles aux bacs vides ou la surcharge des bacs (Figure 1).

Ce processus repose sur une intégration fluide entre les capteurs IoT, la base de données et l'algorithme d'optimisation pour offrir une gestion fiable et dynamique des tournées de collecte. Il débute par la collecte en temps réel des données via des capteurs installés sur chaque bac. Ces capteurs mesurent des paramètres essentiels, notamment le niveau de remplissage, basé sur la distance entre les déchets et le capteur ainsi que le poids des déchets accumulés (bac intelligent).

Les informations recueillies sont ensuite transmises à un serveur central sous forme de fichier CSV (Comma-Separated Values) ou via une base de données SQL (Structured Query Language), permettant au responsable de la planification d'avoir une vue complète et actualisée des quantités de déchets présentes dans chaque bac. Une fois ces données analysées, le

responsable de la planification établit un seuil maximal de remplissage, un paramètre essentiel qui détermine les bacs nécessitant une intervention immédiate.
Ce seuil est stratégique puisqu'il permet d'éviter les trajets

bac, tandis que le capteur HX711 mesure le poids pour confirmer l'information. La carte microcontrôleur ESP32, intégrant un module WiFi, assure la collecte et la transmission des données vers le réseau.

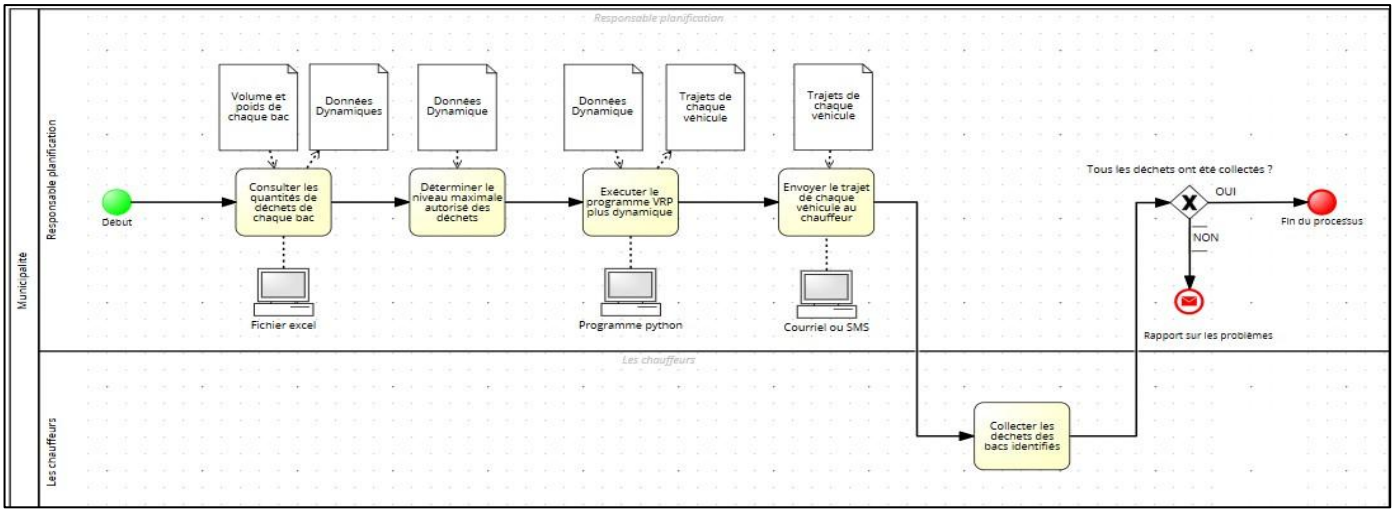


Figure 1. Processus de collecte des déchets intégrant

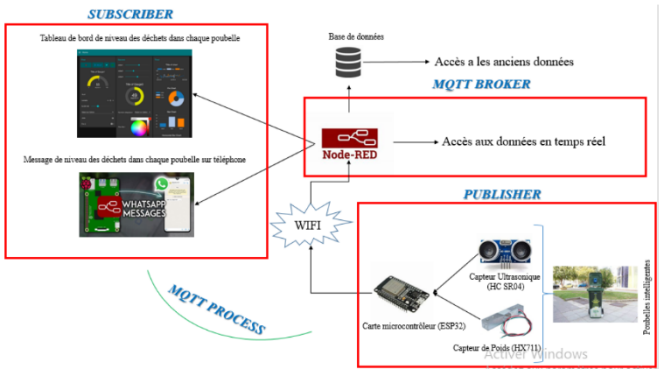
inutiles vers des bacs peu remplis, de prévenir les débordements et de réduire les coûts opérationnels ainsi que les émissions de CO_2 . Les bacs identifiés comme prioritaires sont ensuite intégrés dans un programme de routage de véhicules (VRP) couplé avec l'IoT. Ce programme génère des itinéraires optimaux en tenant compte de plusieurs critères tels que la distance, les coûts de déplacement, les niveaux de remplissage et la minimisation de CO_2 . Grâce à ces données dynamiques, le routage devient plus agile, permettant de répondre efficacement aux besoins en temps réel. Une fois les itinéraires optimaux définis, ils sont transmis aux équipes de collecte via des courriels ou des SMS (Short Message Service). Ces communications rapides fournissent aux équipes les informations nécessaires pour suivre les trajets prédéfinis et collecter efficacement les déchets des bacs identifiés. Après l'exécution des tournées, le responsable de la planification vérifie si tous les déchets ont été ramassés conformément aux itinéraires prévus. Cette étape de suivi garantit que le processus a été réalisé correctement. En cas d'écarts ou d'anomalies, un rapport détaillé est rédigé et transmis aux parties concernées, permettant d'apporter des ajustements pour améliorer les futurs cycles de collecte.
Ainsi, l'intégration de l'IoT dans le processus de collecte des déchets transforme les systèmes traditionnels en solutions intelligentes et durables. Cette approche permet d'optimiser les ressources, de réduire les impacts environnementaux et les coûts, tout en améliorant le service rendu aux citoyens.
Elle constitue une avancée majeure dans la modernisation des villes face aux défis croissants liés à l'urbanisation et à la gestion des ressources.

3.2 Système IoT

Le système IoT joue un rôle central dans la transformation de la gestion des déchets en un processus intelligent et optimisé. Comme décrit dans le processus, le niveau de remplissage des bacs est surveillé en temps réel grâce à l'utilisation d'un système IoT. Ce dernier est structuré selon une architecture à trois couches (Zhihong et al., 2011) (Figure 2).

- Couche de perception (Publisher) : qui comprend les capteurs et dispositifs embarqués qui collectent les données directement sur le terrain. Dans notre étude, le capteur ultrason HC-SR04 mesure la distance entre le capteur et les déchets, permettant ainsi de calculer le pourcentage de remplissage du

- Couche de réseau (MQTT Broker) : est responsable de la transmission des données. Les informations recueillies par les nœuds IoT sont envoyées en temps réel via le protocole MQTT à un serveur central qui joue le rôle de Broker. Ce serveur reçoit, centralise et stocke les données dans une base de données SQL. Cette couche permet ainsi la communication entre la collecte sur le terrain et les applications en aval, en assurant une transmission fiable et sécurisée.
- Couche d'application (Subscriber) : transforme les données brutes en informations exploitables. Par exemple, les données de remplissage sont comparées à des seuils prédéfinis pour déterminer les bacs nécessitant une collecte immédiate. Les informations sur les tendances de remplissage au fil du temps peuvent également être utilisées pour prédire les besoins futurs en collecte.



En outre, les données relatives au niveau de remplissage servent d'entrées pour le modèle de routage, garantissant ainsi une planification optimisée des itinéraires de collecte.

3.3 Modèle mathématique pour l'optimisation des tournées

Le modèle mathématique pour la collecte des déchets a pour objectif d'optimiser les coûts de déplacement et de minimiser les émissions de carbone, tout en respectant différentes contraintes.

3.1.1. Ensembles

M : Ensemble de M groupes de bacs $M = \{1, 2, \ldots, m\}$

B_m : Ensemble de bacs dans le groupe m, $b_{mi} \in B_m, b_{mi} = bac\ i$ dans le groupe m, $\forall m \in M$

$\{0\}$: Dépôt

B : Ensemble de tous les bacs, $B = \{0\} \cup B_1 \cup B_2 \ldots \cup B_m$

K : Ensemble de véhicules

R : Ensemble des trajets

$\partial^+(Z)$: Ensemble des arêtes $(i, j) \in Z \times B \backslash Z$

$\partial^-(Z)$: Ensemble des arêtes $(i, j) \in B \backslash Z \times Z$

B_{mf} : Ensemble des bacs remplis dans le groupe m, niveau de remplissage $\geq TFL$, $B_{mf} \subseteq B_m$, $\forall m \in M$

B_f : Ensemble de tous les bacs remplis, $B_{mf} \subseteq B_m$

$B_f = B_{1f} \cup B_{2f} \cup \ldots \cup B_{mf}$

3.2.2. Paramètres

d_{ij} Distance du nœud *i* au nœud *j* (km)

C_d Coût unitaire de déplacement des véhicules ($/km)

L_i Quantité de déchets au bac *i* (kg)

L Capacité maximale d'un véhicule (kg)

GA_k Émissions de CO_2 par unité de distance pour le véhicule (g CO_2)

TFL Seuil de remplissage (%)

3.1.3. Variables de décision

X_{ijk} : variable binaire qui prend la valeur 1 si le véhicule *k* visite le bac *j* après avoir quitté le bac *i*, 0 sinon.

Y_i : variable binaire qui prend la valeur 1 si un bac *i* est visité dans la solution, 0 sinon.

3.1.4. Fonction objectif

L'objectif principal est de minimiser le coût total et les impacts environnementaux associés à la collecte des déchets. Cela inclut deux éléments majeurs : d'une part, les coûts opérationnels liés aux déplacements des véhicules de collecte, et d'autre part, les émissions de CO_2 résultant de ces déplacements.

$$Min\ Z = \sum \sum \sum X_{ijk}.d_{ij}.C_d + \sum \sum \sum GA_k.d_{ijr}X_{ijk}$$

$\forall i \in B$, $j \in B$, $\forall k \in K$, $r \in R$

3.1.5. Contraintes

Les contraintes considérées dans ce problème sont les suivantes :

(Eq.1) assure que chaque bac est visité exactement une fois.

$$\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in \partial^+ B_m} X_{ijk} = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in \partial^- B_m} X_{ijk} = 1 \quad \forall m \in M \ , \forall k \in K \qquad \text{(Eq.1)}$$

(Eq.2) vérifie que le même véhicule qui visite un bac, quitte ce dernier.

$$\sum_{(i,j) \in \partial^+ B_m} X_{ijk} = \sum_{(i,j) \in \partial^- B_m} X_{jik} \quad \forall m \in M \ , \forall k \in K \qquad \text{(Eq.2)}$$

(Eq.3) assure que chaque véhicule part et revient au dépôt.

$$\sum_{i \in B} X_{i0k} = \sum_{j \in B} X_{0jk} \qquad \forall m \in M \ , \forall k \in K \qquad \text{(Eq.3)}$$

(Eq.4) s'assure de respecter la limite de capacité de chaque véhicule.

$$\sum_{i \in B} \sum_{j \in B} X_{ijk} \times L_i \leq L \qquad \forall k \in K \ , i \neq j \qquad \text{(Eq.4)}$$

(Eq.5) établit le lien entre les décisions de routage et la sélection des bacs à visiter.

$$\sum_{k \in B} \sum_{i \in B} X_{ijk} = Y_i \qquad \forall j \in B \backslash \{0\} \ , \ i = j \qquad \text{(Eq.5)}$$

(Eq.6) concernent les contraintes de sous-tours qui visent à empêcher la création de sous-tours, des trajets qui excluent certains bacs (ou emplacements) du parcours global. En d'autres termes, ces contraintes assurent que la solution obtenue forme un unique circuit couvrant l'ensemble des points ou villes, chaque point étant visité une seule fois, sans générer de circuits isolés au sein du trajet principal.

$$\sum_{j \in S} \sum_{j \in S} X_{ijk} = |S| - 1 \quad \forall k \in K, \forall S \subseteq B \backslash \{0\}, |S| \geq 2 \qquad \text{(Eq.6)}$$

(Eq.7) stipule que si le niveau de remplissage d'un bac dépasse le seuil (TFL), correspondant au niveau de remplissage maximal autorisé, le bac doit être dans la liste des bacs à visiter.

$$\sum_{i \in B_f} Y_i = B_f \qquad \text{(Eq.7)}$$

Variables binaires

$$X_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i \in B \ , \ j \in B \ , \ \forall k \in K \qquad \text{(Eq.8)}$$

$$Y_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in B \ , \ j \in B \ , \ \forall k \in K \qquad \text{(Eq.9)}$$

Dans la section suivante, nous allons présenter la méthodologie de l'algorithme génétique afin d'implanter le modèle.

3.4 Algorithme génétique

Pour résoudre le problème de routage dans un contexte IoT, nous avons développé un algorithme génétique adapté aux contraintes spécifiques de la collecte des déchets. Cet algorithme se concentre sur l'optimisation des itinéraires pour les bacs dont le niveau de remplissage dépasse le seuil prédéfini.

Représentation de la solution

Chaque solution (individu) représente une séquence de bacs à visiter, avec le dépôt comme point de départ et d'arrivée. Par exemple, la solution [Dépôt, Bac3, Bac1, Bac5, Bac2, Dépôt] représente l'ordre de visites des bacs. L'objectif est de trouver l'ordre qui minimise les coûts de déplacement et les émissions de carbone.

Population initiale

Une population initiale est générée avec des itinéraires aléatoires. Par exemple, pour 5 bacs, plusieurs combinaisons sont générées, par exemple :

Solution 1 : [Dépôt, Bac1, Bac3, Bac2, Bac5, Dépôt]

Solution 2 : [Dépôt, Bac5, Bac1, Bac3, Bac2, Dépôt]

Fonction de fitness

La fonction de fitness évalue la qualité de chaque solution. Dans ce cas, la fonction de fitness est simplement basée sur la minimisation des coûts de déplacement

Exemple de fonction de fitness : Fitness = 1 / (Coût total de déplacement et des émissions de carbone)

Sélection

Les solutions les plus performantes (celles avec les coûts les plus faibles) sont sélectionnées pour former la prochaine génération.

Croisement

Le croisement combine deux itinéraires parents pour créer de nouveaux enfants. Par exemple, avec la méthode order crossover, on peut échanger des sous-sections des itinéraires des deux parents pour créer de nouvelles solutions.

Parent 1 : [Dépôt, Bac1, Bac3, Bac2, Bac5, Dépôt]

Parent 2 : [Dépôt, Bac4, Bac5, Bac1, Bac2, Dépôt]

Après croisement

Enfant 1 : [Dépôt, Bac1, Bac4, Bac5, Bac2, Dépôt]

Enfant 2 : [Dépôt, Bac4, Bac3, Bac1, Bac5, Dépôt]

Mutation

La mutation introduit des changements mineurs dans une solution pour explorer de nouvelles possibilités. Dans un problème de trajet, la mutation peut consister à échanger deux bacs aléatoires dans une solution.

Exemple de mutation

Avant mutation : [Dépôt, Bac1, Bac3, Bac2, Bac5, Dépôt]

Après mutation : [Dépôt, Bac1, Bac2, Bac3, Bac5, Dépôt]

Évolution et convergence

L'algorithme génétique répète le processus de sélection, croisement, et mutation pour créer de nouvelles générations de solutions. Au fur et à mesure, la population évolue vers des solutions de meilleure qualité, c'est-à-dire des itinéraires avec des coûts de déplacement plus bas. Le processus continue jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint. Par exemple, un nombre fixe de générations ou une amélioration minimale du coût total.

3.5 Méthode du voisin le plus proche

L'algorithme génétique initial a été enrichi par l'intégration d'une étape de regroupement par voisinage. Auparavant, l'algorithme ne filtrait que les bacs identifiés comme nécessitant une collecte immédiate en fonction d'un seuil prédéfini, fournissant ainsi le trajet du véhicule et la capacité restante. Désormais, une analyse supplémentaire permet d'exploiter la capacité résiduelle du véhicule. Ainsi, si la capacité restante du véhicule est suffisante, le système applique une seconde filtration visant à sélectionner les bacs dont le niveau de remplissage se situe entre un seuil inférieur et le seuil de collecte immédiate.

Ensuite, deux contraintes supplémentaires sont imposées pour chaque bac candidat :

- La quantité à collecter du bac ne doit pas dépasser la capacité restante du véhicule.
- Le bac doit être géographiquement proche d'un bac déjà inclus dans l'itinéraire, afin d'optimiser les coûts de déplacement et de réduire les émissions de CO_2 .

Lorsque ces conditions sont remplies, le bac est intégré à la solution, et le modèle utilise ces nouvelles données pour recalculer et optimiser l'itinéraire, fournissant ainsi le parcours optimal.

4 EXPERIMENTATIONS

4.1 Données d'entrée

Pour effectuer les tests de notre modèle, nous avons utilisé un ensemble de données enrichi par les niveaux de remplissage mesurés par les capteurs IoT. Ces données incluent notamment les coordonnées géographiques des bacs et leurs niveaux de remplissage. Le Tableau 1 présente les informations qui servent de base pour comparer les performances de différents modèles de gestion.

Tableau 1. Données d'entrée

Localisation	X	Y	Niveau de remplissage
Hampstead	48.8566	2.3522	25
Laval	45.7640	4.8357	80
Vendôme	41.8955	12.4823	77
Cote des neiges	34.0522	-118.2437	77
Champs de mars	40.7128	-74.0060	35
Bonaventure	39.9042	116.4074	30
Lucien l'allier	38.9072	77.0369	16
Georges-vannier	35.6895	139.6917	67
Lionel Groulx	33.7490	-84.3880	67
Villa maria	32.7157	-117.1611	16
Snowdon	29.7604	-95.3698	78
Côte Ste Catherine	28.5383	-81.3792	71
Plamondon	25.7617	-80.1918	82
Namur	39.9526	-75.1652	16
Cote vertu	37.7749	-122.4194	10

Pour les tests, nous avons fixé le seuil de remplissage maximal à 70 % afin de vérifier la fiabilité de l'algorithme. Par ailleurs, pour l'application de la méthode de regroupement par voisinage, un intervalle de niveau de remplissage allant de 20 % à 69 % a été défini afin de sélectionner les bacs avec une demande modérée pouvant être ajoutée au trajet si la capacité restante du véhicule le permet. Il est toutefois à noter que ces seuils pourront être ajustés dynamiquement en fonction des données en temps réel fourni par le système IoT.

4.2 Résultats expérimentaux

Après intégration des données dans notre programme et exécution de l'algorithme, nous avons obtenu une liste de bacs dont le niveau de remplissage est supérieur ou égal à 70 %. Cette étape est cruciale, car elle permet de cibler exclusivement les bacs nécessitant une intervention immédiate, éliminant ainsi les arrêts vers des bacs partiellement remplis. Cette approche permet d'optimiser l'itinéraire en concentrant les ressources sur les localisations critiques et en éliminant les trajets vers des bacs partiellement remplis.

Pour évaluer l'impact de l'intégration de l'IoT et des approches dynamiques sur la collecte des déchets, nous avons comparé trois approches (Tableau 2.) :

- Modèle traditionnel sans IoT : itinéraires fixes prédéfinis.
- Modèle dynamique basé sur l'IoT : utilisation des données en temps réel pour optimiser l'itinéraire.
- Modèle dynamique basé sur l'IOT et le voisin le plus proche: approche dynamique enrichie par la méthode du regroupement par voisinage pour exploiter la capacité restante.

Tableau 2. Comparaison entre les trois approches

	Coût de déplacement ($)	Émissions de CO_2 (g CO_2 /km)	Nombre véhicules	Capacité restante (kg)
Modèle traditionnel sans IoT	146	146	3	300
Modèle dynamique basé sur l'IoT	58 (↘60%)	58	1	135
Modèle dynamique IoT & voisin le plus proche	65 (↘55%)	65	1	1

4.2.1. Résultats comparatifs : Modèle traditionnel sans IoT vs Modèle dynamique basé sur l'IoT

La comparaison des résultats entre le modèle traditionnel basé sur l'algorithme génétique standard et le modèle dynamique basé sur l'IoT démontre une nette amélioration en termes de performance. L'intégration des données en temps réel via l'IoT a permis de réduire les coûts de déplacement ainsi que les émissions de CO_2 de 60 %, illustrant ainsi l'efficacité accrue du processus de collecte. En ajustant les itinéraires en fonction de l'état actuel des conteneurs et en éliminant les trajets superflus, ce système permet non seulement de diminuer les

dépenses opérationnelles, mais également de réduire l'empreinte environnementale. Ces résultats soulignent les avantages concrets de l'IoT pour une gestion plus efficiente et durable des déchets.

Par ailleurs, l'analyse des données révèle que certains conteneurs, notamment ceux situés à Georges-Vanier et Lionel-Groulx, affichent un taux de remplissage proche du seuil critique de 70 %, avec une capacité résiduelle de 135 kg pour la collecte. Cependant, ce niveau de remplissage est susceptible d'augmenter au cours de la journée en fonction des variations de production des déchets. Si cette tendance persiste, il est envisageable que le taux de remplissage dépasse les 100 %, augmentant ainsi le risque de débordement. Un débordement pourrait entraîner des complications logistiques et avoir des répercussions environnementales, telles que la pollution des espaces publics et des désagréments pour la communauté. Ces enjeux nécessitent une gestion proactive afin d'éviter toute situation critique.

4.2.2 Résultats comparatifs : La méthode du voisin le plus proche

Suite à l'application de la méthode du plus proche voisin, une liste de conteneurs pouvant être ajoutés à l'itinéraire sans dépasser la capacité résiduelle de 135 kg a été générée. Le modèle a alors filtré ces conteneurs en fonction de leur proximité par rapport à l'itinéraire actuel tout en respectant la capacité disponible. Simultanément, il a identifié les bacs les plus proches ainsi que les conteneurs dont le niveau de remplissage est supérieur ou égal à 70 %. Ce nouvel ensemble de données, qui remplace celui initialement utilisé, constitue la base de l'optimisation du trajet. D'après les résultats obtenus (Tableau 2.), l'analyse indique que le coût total de déplacement et les émissions totales de CO_2 ont légèrement augmenté par rapport à l'utilisation de la collecte des déchets basée sur l'IoT. En effet, le coût de déplacement s'élève à 65 $ et le coût des émissions de CO_2 à 65 $. Cette augmentation est principalement due à l'augmentation du nombre de bacs collectés. Toutefois, ces valeurs restent inférieures à celles observées pour la collecte standard des déchets, sans utilisation des systèmes IoT.

Pour mieux comprendre ces différences, nous avons préparé un tableau comparatif entre les trois processus (Tableau 5). Ce tableau permet de visualiser les variations de coûts et d'émissions, et d'évaluer l'efficacité relative de chaque méthode.

D'après le tableau comparatif, il apparaît que le processus de collecte des déchets utilisant l'IoT combiné à la méthode du voisin le plus proche présente des coûts totaux de déplacement et des émissions totales de CO_2 proches de ceux obtenus avec l'IoT uniquement. Cependant, ces coûts sont largement inférieurs à ceux du processus de collecte standard des déchets. De plus, le système IoT associé au voisin le plus proche se distingue par une utilisation plus efficace du nombre de véhicules par rapport au processus standard, qui nécessite trois véhicules. En termes d'utilisation de la capacité des véhicules, ce processus est également le plus performant, exploitant mieux la capacité disponible par rapport aux deux autres méthodes. Enfin, il répond à la problématique concernant le débordement des bacs proches du seuil de 70 %, qui cause des impacts environnementaux négatifs. Ainsi, le nouveau processus de collecte des déchets apparaît comme le plus avantageux, en minimisant les coûts et les émissions tout en optimisant l'utilisation des ressources et en résolvant les problèmes liés au débordement des bacs.

5 CONCLUSION

L'intégration des technologies IoT dans la gestion des déchets a permis de transformer significativement l'approche de collecte, en passant d'un système statique à une méthode dynamique et data-driven. Les expérimentations menées démontrent que l'exploitation des données en temps réel issues des capteurs permet non seulement de réduire les déplacements inutiles, mais également de diminuer les coûts opérationnels et les émissions de CO_2 jusqu'à 60 % par rapport aux méthodes traditionnelles. Cette amélioration repose sur l'optimisation des itinéraires par un algorithme génétique enrichi de la méthode du plus proche voisin, qui ajuste les tournées en fonction de l'état réel des conteneurs et de leur proximité géographique.

Les résultats indiquent que l'approche IoT offre une réactivité accrue et une meilleure allocation des ressources, permettant une utilisation plus efficace des véhicules et réduisant le nombre requis pour la collecte. Bien que l'ajout de la méthode du plus proche voisin entraîne une légère augmentation des coûts par rapport à l'utilisation exclusive des données IoT, ces coûts restent largement inférieurs à ceux observés avec la collecte standard, tout en répondant efficacement au risque de débordement des conteneurs.

En somme, cette étude met en lumière le potentiel de l'IoT pour repenser et améliorer durablement les systèmes de gestion des déchets dans un contexte d'urbanisation rapide. Elle ouvre la voie à de nouvelles perspectives de recherche, notamment l'ajustement dynamique des seuils de collecte et l'intégration de variables contextuelles supplémentaires, afin de renforcer encore l'efficacité opérationnelle et environnementale de ces systèmes intelligents.

6 REFERENCES

Akbarpour, N., Salehi-Amiri, A., Hajiaghaei-Keshteli, M., & Oliva, D. (2021). An innovative waste management system in a smart city under stochastic optimization using vehicle routing problem. Soft Computing, 25(8), 6707-6727. https://doi.org/10.1007/s00500-021-05669-6

Amal, L., Son, L. H., & Chabchoub, H. (2018). SGA: spatial GIS-based genetic algorithm for route optimization of municipal solid waste collection. Environmental Science and Pollution Research, 25(27), 27569-27582. https://doi.org/10.1007/s11356-018-2826-0

Anagnostopoulos, T., Kolomvatsos, K., Anagnostopoulos, C., Zaslavsky, A., & Hadjiefthymiades, S. (2015). Assessing dynamic models for high priority waste collection in smart cities. Journal of Systems and Software, 110, 178-192. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jss.2015.08.049

Babaee Tirkolaee, E., Abbasian, P., Soltani, M., & Ghaffarian, S. A. (2019). Developing an applied algorithm for multi-trip vehicle routing problem with time windows in urban waste collection: A case study. Waste Management & Research, 37(1_suppl), 4-13. https://doi.org/10.1177/0734242X18807001

Belhiah, M., El Aboudi, M., & Ziti, S. (2024). Optimising unplanned waste collection: An IoT-enabled system for smart cities, a case study in Tangier, Morocco. IET Smart Cities, 6(1), 27-40. https://doi.org/https://doi.org/10.1049/smc2.12069

Braekers, K., Ramaekers, K., & Van Nieuwenhuyse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. Computers & Industrial Engineering, 99, 300-313.

Carić, T., Galić, A., Fosin, J., Gold, H., & Reinholz, A. (2008).

A modelling and optimization framework for real-world vehicle routing problems. IntechOpen.

Cheela, V. S., Ranjan, V. P., Goel, S., John, M., & Dubey, B. (2021). Pathways to sustainable waste management in Indian Smart Cities. Journal of Urban Management, 10(4), 419-429.

Christodoulou, S., Alefragis, P., Gizas, A., Asimakopoulos, G., & Triantafillou, V. (2016). Dynacargo routing subsystem and its algorithms for efficient urban waste collection. 11th International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling (PATAT2016),

de Morais, C. S., Ramos, T. R. P., Lopes, M., & Barbosa-Póvoa, A. P. (2024). A data-driven optimization approach to plan smart waste collection operations. International Transactions in Operational Research, 31(4), 2178-2208. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/itor.13235

Dereci, U., & Karabekmez, M. E. (2022). The applications of multiple route optimization heuristics and meta-heuristic algorithms to solid waste transportation: A case study in Turkey. Decision Analytics Journal, 4, 100113. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dajour.2022.100113

Faccio, M., Persona, A., & Zanin, G. (2011). Waste collection multi objective model with real time traceability data. Waste Management, 31(12), 2391-2405. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.07.005

Ferrer, J., & Alba, E. (2019). BIN-CT: Urban waste collection based on predicting the container fill level. Biosystems, 186, 103962. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2019.04.006

Hannan, M. A., Akhtar, M., Begum, R. A., Basri, H., Hussain, A., & Scavino, E. (2018). Capacitated vehicle-routing problem model for scheduled solid waste collection and route optimization using PSO algorithm. Waste Management, 71, 31-41. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.019

Heijnen, W. (2019). Improving the waste collection planning of amsterdam University of Twente].

Henaien, A., Ben Elhadj, H., & Chaari Fourati, L. (2024). A sustainable smart IoT-based solid waste management system. Future Generation Computer Systems, 157, 587-602. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.future.2024.03.056

Hrabec, D., Senland, P., Nevrlý, V., Popela, P., Hoff, A., Šomplák, R., & Pavlas, M. (2019). Quantity-predictive vehicle routing problem for smart waste collection. Chemical Engineering Transactions.

Hua, T. M., Nguyen, T. K., Thi, H. V. D., & Thi, N. A. N. (2016). Towards a decision support system for municipal waste collection by integrating geographical information system map, smart devices and agent-based model Proceedings of the 7th Symposium on Information and Communication Technology, Ho Chi Minh City, Vietnam. https://doi.org/10.1145/3011077.3011129

Jorge, D., Pais Antunes, A., Rodrigues Pereira Ramos, T., & Barbosa-Póvoa, A. P. (2022). A hybrid metaheuristic for smart waste collection problems with workload concerns. Computers & Operations Research, 137, 105518. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105518

Karadimas, N. V., Kouzas, G., Anagnostopoulos, I., & Loumos, V. (2005). Urban solid waste collection and routing: The ant colony strategic approach [Article]. International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology, 6(12-13), 45-53. https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-33947229960&partnerID=40&md5=010378684505060b309a686ee130e423

Kim, J., Manna, A., Roy, A., & Moon, I. (2025). Clustered vehicle routing problem for waste collection with smart operational management approaches. International Transactions in Operational Research, 32(2), 863-887. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/itor.13282

Kinobe, J. R., Bosona, T., Gebresenbet, G., Niwagaba, C. B., & Vinnerås, B. (2015). Optimization of waste collection and disposal in Kampala city. Habitat International, 49, 126-137. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2015.05.025

Lozano, Á., Caridad, J., De Paz, J. F., Villarrubia González, G., & Bajo, J. (2018). Smart Waste Collection System with Low Consumption LoRaWAN Nodes and Route Optimization. Sensors, 18(5), 1465. https://www.mdpi.com/1424-8220/18/5/1465

Mallikarjuna Raju, K., Banuri, S., Shaik Abdussami, H., Kowdi, S., Saleh Mashkour, M., Manjunatha, Singh, N., & Kumar, A. (2024). IoT-based smart garbage monitoring system and advanced disciplinary approach. E3S Web of Conf., 507, 01031. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450701031

Martikkala, A., Mayanti, B., Helo, P., Lobov, A., & Ituarte, I. F. (2023). Smart textile waste collection system – Dynamic route optimization with IoT. Journal of Environmental Management, 335, 117548. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117548

Mohammadi, M., Jämsä-Jounela, S.-L., & Harjunkoski, I. (2019). Optimal planning of municipal solid waste management systems in an integrated supply chain network. Computers & Chemical Engineering, 123, 155-169. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.12.022

Moreno-Monroy, A. I., Schiavina, M., & Veneri, P. (2021). Metropolitan areas in the world. Delineation and population trends. Journal of Urban Economics, 125, 103242.

Omara, A., Gulen, D., Kantarci, B., & Oktug, S. F. (2018). Trajectory-Assisted Municipal Agent Mobility: A Sensor-Driven Smart Waste Management System. Journal of Sensor and Actuator Networks, 7(3), 29. https://www.mdpi.com/2224-2708/7/3/29

Ramos, T. R. P., de Morais, C. S., & Barbosa-Póvoa, A. P. (2018). The smart waste collection routing problem: Alternative operational management approaches. Expert Systems with Applications, 103, 146-158. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.03.001

Son, L. H. (2014). Optimizing Municipal Solid Waste collection using Chaotic Particle Swarm Optimization in GIS based environments: A case study at Danang city, Vietnam. Expert Systems with Applications, 41(18), 8062-8074. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.07.020

Strand, M., Syberfeldt, A., & Geertsen, A. (2020). A Decision Support System for Sustainable Waste Collection. In I. R. Management Association (Ed.), Waste Management: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications (pp. 347-365). IGI Global. https://doi.org/10.4018/978-1-7998-1210-4.ch016

Wu, H., Tao, F., & Yang, B. (2020). Optimization of Vehicle Routing for Waste Collection and Transportation. International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(14), 4963. https://www.mdpi.com/1660-4601/17/14/4963

Zhihong, Y., Yingzhao, Y., Yu, Y., Yufeng, P., Xiaobo, W., & Wenji, L. (2011, 26-28 July 2011). Study and application on the architecture and key technologies for IOT. 2011 International Conference on Multimedia Technology,

CIGI QUALITA MOSIM 2025
Cadre d'analyse et revue de littérature sur le potentiel de réduction d'impact environnemental des méthodes d'efficience industrielle dans l'industrie de la mode et du luxe

COME CITROËN[1], ANDREE-ANNE LEMIEUX[1], STEVE EVANS[2]

[1] INSTITUT FRANÇAIS DE LA MODE
34 quai Austerlitz 75013 Paris, France
ccitroen@ifmparis.fr

[2] UNIVERSITY OF CAMBRIDGE
Institute for Manufacturing,
CB3 0FS, United Kingdom

***Résumé* – Au cours des dernières décennies, l'industrie de la mode et du luxe est devenue l'un des secteurs d'activité les plus polluants. En pleine crise climatique, les conséquences environnementales de son système de production sont régulièrement dénoncées, poussant les principaux acteurs du luxe à adopter des objectifs de réduction ambitieux. La transformation des pratiques industrielles est reconnue comme un levier majeur pour la réduction de l'impact environnemental du secteur, la phase de production étant une source considérable de consommation d'énergie et d'eau, de génération de déchets et d'émissions de gaz à effet de serre. Alors que les méthodes de performance industrielle telles que le Lean ou le Six Sigma ont été largement étudiées dans la littérature scientifique, leur applicabilité au luxe et leur potentiel de réduction d'impact environnemental restent peu explorés. Ainsi, un cadre d'analyse a été développé pour conduire une revue de littérature. Ce cadre vise à établir une analyse croisée des méthodes de performance et d'efficience industrielle, selon leur potentiel de réduction d'impact environnemental et leur applicabilité à l'industrie du luxe. Suivant ce cadre, la revue de littérature a souligné des manques au travers des méthodes étudiées et a identifié des opportunités de recherche-intervention transformative pour une production durable.**

***Abstract* – With ever increasing production volumes over the past decades, the fashion and luxury industry has become one of the most polluting industries globally. Amidst the climate crisis, the environmental impacts of its production system have come under increased scrutiny, resulting in ambitious reduction goals from industry leaders, especially in the luxury fashion segment. In this context, the transformation of manufacturing practices is a major lever for the reduction of the industry's environmental impact, as considerable energy and water consumption, waste generation, and greenhouse gas emissions occur at the production stage. While manufacturing efficiency methods, such as Lean Manufacturing or Six Sigma have been widely studied in academic literature, their applicability to the luxury fashion industry and resultant impact on sustainability remain largely underexplored. Consequently, an analysis framework for a literature review and subsequent literature review were developed and conducted. This framework aims at establishing a cross-analysis of industrial performance and manufacturing efficiency methods, attempting to uncover their potential for environmental impact reduction and applicability to the luxury fashion industry. Following this framework, the literature review managed to highlight research gaps and identify major opportunities for future transformative intervention research and implementation in sustainable manufacturing within the luxury fashion industry.**

***Mots clés* - mode, luxe, performance industrielle, production durable, impact environnemental**
***Keywords* – fashion, luxury, manufacturing efficiency, sustainable manufacturing, environmental impact**

1 INTRODUCTION

Au cours des dernières décennies, les méthodes d'efficience industrielles ont radicalement transformé le mode de fonctionnement dans certaines industries comme les industries automobile et électronique, leur permettant d'obtenir des gains d'efficience considérables et compensant une partie de leurs augmentations d'usage.

Pendant ce temps, l'industrie de la mode s'est déployée à un rythme soutenu, menant la consommation mondiale de fibres textiles à quadrupler en absolu et doubler par habitant en 50 ans [Textile Exchange, 2025]. L'industrie du luxe s'est développée à un rythme encore plus rapide [Donzé et Fujioka, 2017] mais peu de recherches ont été conduites sur le déploiement ou le potentiel de nouvelles techniques industrielles pour réduire l'impact environnemental de ces industries.

Cet article vise à établir une vue générale de la littérature académique existante combinant les méthodes d'efficience industrielle, les résultats démontrés en termes d'impact environnemental et les applications dans les secteurs du luxe, de la mode, de l'habillement et du textile.

2 METHODOLOGIE

Cet article propose un cadre d'analyse pour conduire une revue de littérature systématique basée sur des mots clés et des opérateurs booléens, comme recommandé par Tranfield et al. [2003].

La méthode de recherche du présent document consiste à identifier des articles scientifiques en anglais à l'intersection d'une série de méthodologies industrielles, de noms d'industries et de types de gains environnementaux définis ci-après.

2.1 Concepts et méthodes industriels

Au vu du nombre important de pratiques et de méthodes d'efficience industrielle existantes, il peut être difficile d'établir une liste limitée des méthodes à étudier.

Cette section présente les six méthodes qui ont été sélectionnées car estimées les plus pertinentes pour être étudiées ici.

2.1.1 Lean Manufacturing

Le *lean manufacturing*, aussi connu sous le nom de *Toyota Production System*, est reconnu comme étant la plus notoire et la plus répandue parmi les méthodes de génie industriel. Il a été développé au long du XXe siècle et vise à éliminer les « gaspillages » dans le processus de production à travers deux piliers : l' « autonomation » (ou *jidoka* en japonais) et le juste-à-temps [Ohno et Bodek, 2019]. Le terme *Lean green* (ou *lean-green*) peut également être utilisé lorsque le Lean est appliqué pour des gains environnementaux.

2.1.2 Six Sigma

Le *Six Sigma* est une méthode de gestion de la qualité qui utilise des outils statistiques pour réduire le taux de défauts dans la production. Il se base typiquement sur un processus en 5 étapes : Définir, Mesurer, Analyser, Améliorer, Contrôler (DMAIC), et possède également des variantes telles que DMADV [Montgomery et Woodall, 2008].

2.1.3 Lean Six Sigma

Le *Lean Six Sigma* (LSS) est une méthode hybride développée dans les années 2000 et combinant les approches et outils du Lean et l'analyse de données avancée du Six Sigma. [Jiju et al., 2017]

2.1.4 Production agile

La production agile (*Agile Manufacturing* en anglais), est un ensemble de techniques de production visant la robustesse, la résilience, la réactivité, la flexibilité et l'innovation plutôt que l'efficience. Il existe également une version hybride avec le Lean, généralement appelée *Leagile*, qui a aussi été utilisé comme terme de recherche. [Lemieux et al., 2012]

2.1.5 Industrie 4.0

L'Industrie 4.0, en anglais *Industry 4.0* (I4.0), est un concept relatif à la 4e révolution industrielle ayant débuté dans les années 2000 et visant une transformation radicale de l'industrie à travers des usines et technologies intelligentes, connectant entre elles des machines, robots et autres technologies numériques avancées. [Caballero-Morales et al., 2023]

2.1.6 Industrie 5.0

L'Industrie 5.0, en anglais *Industry 5.0* (I5.0), s'est séparée de l'I4.0 en 2018, notamment en ajoutant des éléments d'interaction humain-machine, de soutenabilité et de transformation industrielle motivée par des transformations sociétales. Les trois piliers de l'I5.0 sont la soutenabilité, la résilience et la focalisation sur l'humain. [Barata et Kayser, 2023] [Van Erp et al., 2024]

2.2 Définition des termes sectoriels

Alors que les termes de mode, textile et habillement sont souvent utilisés de manière interchangeable dans la littérature, ils peuvent avoir des significations et implications très différents lorsqu'ils sont considérés sous l'angle de leur définition stricte.

Une définition stricte de l'industrie de la mode (*fashion industry* en anglais) intègre des objets pouvant être portés (incluant des accessoires comme des sacs à main), utilisant différents types de matériaux, textiles ou non. Le concept comprend également un phénomène sociologique au-delà du simple usage pratique, à travers le renouvellement permanent, comme souligné par Serdari [Serdari, 2020]. De manière plus opérationnelle, cela implique des taux de changement importants, des changements fréquents de la production et des temps de développement courts, chacun de ces facteurs pouvant être un potentiel obstacle à l'amélioration continue, l'efficience industrielle et de manière plus générale, à la durabilité et à l'efficience opérationnelle. [Lemieux et al., 2012]

L'industrie de l'habillement (*garment industry* en anglais), quant à elle, se compose de n'importe quel vêtement et vient donc avec un angle plus pratique, pouvant inclure des vêtements basiques produits de manière continue et sans variation. Cette dénomination n'inclut généralement pas les accessoires.

L'industrie textile (en anglais, *textile industry*) est à la fois plus large et plus restrictive, car elle n'inclut que des matériaux qui sont tissés ou tricotés, excluant donc le cuir par exemple, tout en incluant de nombreux objets qui ne relèvent pas de l'habillement, comme des draps, des nappes ou même des lingettes pour bébé.

Enfin, l'industrie de la mode de luxe (en anglais, *luxury fashion industry*) est bien identifiée comme ayant une définition distincte des précédentes catégories, mais correspond à un segment de l'industrie de la mode. Le luxe va bien au-delà de la réponse à un usage et fait appel à des valeurs telles que la qualité, la rareté, le savoir-faire impliquant du travail manuel, et souvent des matériaux de haute valeur. Une partie de la recherche sur ce sujet utilise le terme moins

spécifique d'industrie du luxe (*luxury industry* en anglais), qui a également été utilisé comme terme de recherche dans la littérature. [Vanacker et al., 2022]
Les spécificités de l'industrie de la mode d'une part, et de l'industrie du luxe d'autre part, rendent pertinente leur étude séparée des autres catégories, qui auraient aussi pu inclure des termes comme *apparel* ou *clothing*. Cette recherche a cependant été restreinte à l'industrie de la mode et du luxe d'une part et les industries du textile et de l'habillement de l'autre.

2.3 Types et sources d'impact environnemental

Ce document s'intéresse à différents types et sources d'impact environnemental, il est alors essentiel de les définir et d'expliquer pourquoi ils ont été sélectionnés.
Les émissions (en anglais *emissions*) couvrent toutes les émissions dans l'air, incluant les Gaz à Effet de Serre (GES), les particules fines, et d'autres substances. Le réchauffement climatique et la pollution atmosphérique sont des problèmes majeurs pour l'humanité au niveau mondial comme local, et le secteur industriel est directement responsable de 24% des émissions mondiales de GES. [IPCC, 2023]
L'énergie (en anglais, *energy*), n'est pas un impact environnemental direct, mais est une source d'impact et un point de focalisation fréquent dans l'efficience industrielle. L'énergie (principalement l'électricité) est une des principales sources d'émissions indirectes des usines. Pour référence, la production d'énergie est responsable de 34% des émissions mondiales de GES en 2019. [IPCC, 2023]
Les matériaux, ainsi que les déchets, la circularité et les chutes de production (en anglais : *materials*, *waste*, *circularity* et *scrap*) sont aussi un point de focalisation car ils sont tous liés à l'efficience en matériaux et sont des métriques importantes pour l'efficience opérationnelle du fait des coûts des matériaux. Cette pertinence est également valable en termes d'empreinte environnementale. En effet, les matériaux et composants en constituent souvent un des principaux contributeurs dans les industries manufacturières.
Les défauts, le retravail et la qualité (en anglais : *defects*, *rework* et *quality*) ont également été choisis comme mots-clés, étant donné que les problèmes de qualité demandent une utilisation supplémentaire des machines et l'achat ou la production de composants ou matériaux supplémentaires, cela représentant un gaspillage de ressources et engendrant des impacts environnementaux évitables.
Enfin, l'eau (en anglais *water*) a été choisie car l'industrie est un utilisateur de premier ordre des ressources, mettant les usines sous une pression réglementaire croissante pour réduire leur consommation d'eau. Cette tendance devrait s'intensifier, alors que les changements climatiques entrainent une augmentation de la pénurie en eau. [IPCC, 2023]

2.4 Détails de la recherche

La recherche a été effectuée à travers l'exécution de plusieurs séries de recherches en anglais sur Google Scholar et Science Direct, utilisant différentes structures : la première approche a utilisé le format suivant : « [méthode industrielle] » ET « [nom de l'industrie] » ET *Sustainability* (volontairement laissé comme un terme thématique, non spécifique et non strict). Cela a permis d'obtenir une première série d'articles, parmi lesquels seuls ceux ayant des titres jugés pertinents ont été retenus. Si cette recherche donnait lieu à des centaines de résultats et que la plupart étaient jugés comme non pertinents, la recherche était restreinte seulement aux papiers ayant le nom de la pratique industrielle dans leur titre. Les mots clés liés à chacun des types d'impact sélectionnés ont ensuite été recherchés dans chacun des articles, et retenus si des résultats pertinents étaient identifiés.
Etant donné que l'objectif était d'exposer l'état actuel de la recherche et ses manquements plutôt que d'établir une liste exhaustive de tous les articles de recherche liés à un sujet, des recherches additionnelles ont été effectuées lorsqu'aucun document pertinent ne pouvait être identifié pour une combinaison de méthode, industrie et type d'impact. Dans ce cas, le format de requête suivant a été utilisé : « [méthode industrielle] » ET « [nom de l'industrie] » ET « [type de gain environnemental] ».
Enfin, une technique d'élargissement du corpus en boule de neige a été adoptée pour élargir la base des documents pertinents.

3 RESULTATS

Les résultats de la recherche sont résumés dans le **Tableau 1.** Etant donné que les études de cas et autres cas d'application pratique ne peuvent se faire qu'après une forme de théorie, de cadre méthodologique, de conjecture ou de modèle d'application – toutes les parties du tableau qui indiquent une étude de cas impliquent aussi une forme d'étude théorique.

Tableau 1. Vue d'ensemble de la littérature et des lacunes identifiées à travers l'application du cadre d'analyse

	Emis.			Energ.			Mat.			Déf.			Eau		
	L	F	G	L	F	G	L	F	G	L	F	G	L	F	G
Lean	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
SS			P			P		P	P			P			P
LSS									P			P			
Agile			P									P			
I4.0	T	T	T	T	T	T	T	T	T	P	T	T	P	T	T
I5.0		T	T		T	T		T	T		T	T		T	T

Légende : F : Fashion, G : Garment/Textile, P : Etude de cas/application pratique, T : Etude/Cadre théorique – Emis. : Emissions, Energ. : Energie, Mat. : Matériaux, Déf : Défauts

Le potentiel d'impact environnemental du lean dans l'industrie de la mode et du luxe a été identifié à la fois par des contributions théoriques et des démonstrations pratiques, comme souligné par Bilancia et al. [2025] dans leur revue de littérature focalisée sur 30 articles de revues académiques montrant l'impact environnemental d'une série de pratiques lean dans l'industrie de la mode de luxe. Malgré le fait que les types d'impacts n'y sont pas catégorisés, la présente recherche a identifié que tous les types d'impacts décrits précédemment y sont retrouvés. La démonstration du potentiel des pratiques lean est également faite par Bilancia et al. [2024] à travers une étude de cas basé sur des entretiens dans deux usines. De plus, une étude de cas conduite au Pérou montre les différents types d'impacts observés lors de l'usage de lean green dans l'industrie textile, soulignant des impacts dans chacune des catégories, ainsi que des opportunités de réplication. [De-la-Flor et al., 2024]
Concernant six sigma, alors que de nombreux documents montrent des améliorations sur les défauts dans l'industrie de l'habillement, dont de nombreuses études de cas [Kankariya et Valase, 2017] [Kurnia et al., 2021] [Abbes et al., 2018] [Hussain et al., 2014] [Mridha et al., 2019] [Nupur et al., 2018] [Uddin et Rahman, 2014], aucune application n'a été trouvée pour l'industrie de la mode à proprement parler, à fortiori pour

la mode de luxe. Cependant, Melosi et al. [2018] ont présenté un dérivé du DMADV, qui a été appliqué à la découpe du cuir pour la mode et a mené à des réductions de la quantité de déchets. Kurnia et al. [2021] ont également montré des taux réduits de chutes de production dans une usine de chaussettes en utilisant six sigma, démontrant donc un potentiel pour l'industrie de l'habillement. Enfin, un mémoire de MSc de la National University of Science and Technology of Pakistan présente un ensemble de résultats positifs sur les émissions, l'énergie, les déchets et l'eau à travers l'implémentation de six sigma dans une usine textile. [Shah, 2024]

De manière similaire, aucun article académique sur l'impact environnemental du LSS dans l'industrie de la mode ou du luxe n'a pu être identifié, alors que les occurrences pertinentes dans le textile sont concentrées autour des problématiques de déchets [Kurnia et al., 2021b] [Karthi et al., 2013] [Alie et Sarjono, 2022] et de qualité [Kurnia et al., 2021b] [Karthi et al., 2013] [Alie et Sarjono, 2022] [Dinulescu et Dima, 2019] [Fibriani et al., 2023] [Dagne, 2023], principalement dans des études de cas ou des revues de littératures qui ne sont pas axées sur le développement durable.

Seul un papier de Lv et Cho [2024] a été identifié pour établir un lien entre les méthodes agiles, l'industrie textile et des impact environnementaux spécifiques (en termes de qualité et d'émissions de CO2), à travers une étude de cas. Cet article souligne également une tension inhérente entre agilité et durabilité. Aucun des documents étudiés n'a établi de lien direct entre la production agile et des impact environnementaux spécifiques dans l'industrie de la mode ou du luxe.

Quant à l'Industrie 4.0, Glogar et al. [2025] ont récemment effectué une revue de littérature à l'intersection des pratiques des pratiques les plus communes de l'Industrie 4.0, et de la responsabilité environnementale dans les industries de la mode, du textile et de l'habillement (utilisées de manière interchangeable). Démontrant l'applicabilité de l'Industrie 4.0 pour l'ensemble des types d'impacts recherchés, cet article souligne également le fait que la recherche sur ce sujet est principalement théorique à travers des cadres d'application et d'analyse et demande de plus nombreux cas d'implémentation complète. D'autre part, Gazzola et al. [2024] ont effectué une étude bibliométrique sur la « *digitainability* » (contraction de *digital*, numérique, et *sustainability*, soutenabilité) dans l'industrie de la mode, ce qui la classifie à la fois comme I4.0 et I5.0, et qui souligne un possible impact des technologies de production additive sur les déchets de matériaux et la réduction des émissions. De surcroit, Caballero-Morales et al. [2023] ont développé un modèle d'implémentation pour le déploiement de l'Industrie 4.0 dans les Petites et Moyennes Entreprises (PME) dans le secteur textile, qui montre notamment un potentiel de réduction de consommation d'eau et de génération de déchets lors du processus de teinture. Pour l'industrie du luxe, Bilancia et al. [2025], et Ranfagni et Ozuem [2022] soulignent une absence de littérature et un besoin de recherche sur l'empreinte environnementale de l'Industrie 4.0 dans le secteur, alors que seule un mémoire de MSc du Politecnico di Milano avec une étude de terrain bien documentée se penche réellement sur ce sujet, démontrant ou tirant des hypothèses sur tous les types d'impacts, et incluant quelques résultats documentés sur des technologies I4.0 spécifiques, avec des impacts sur la consommation d'eau et le contrôle de la qualité. [Riva et al., 2020]

Enfin, sur l'Industrie 5.0, plusieurs papiers théoriques présentant différents cadres et modèles d'application, mais sans aucune réelle étude de cas ont mis en évidence un potentiel d'impact environnemental dans le textile et la mode, à l'exemple de Glogar et al. [2025] et Gazzola et al. [2024] Du côté du textile, Al Amin et al. [2025] ont développé un cadre applicatif pour l'Industrie 5.0 en synergie avec la *Green Supply Chain Management* pour l'industrie de l'habillement au Bangladesh, et avance un potentiel d'impact sur les émissions, l'énergie, les déchets et la qualité. Du côté de la mode de luxe, aucun document pertinent n'a pu être identifié.

4 DISCUSSION ET PERSPECTIVES POUR LES FUTURES RECHERCHES

Cette recherche non exhaustive a mené à l'identification de 24 documents académiques pleinement pertinents, couvrant 27 intersections de méthode, industrie et typologie d'impact avec du contenu à la fois théorique et pratique, 23 intersections de plus avec uniquement des résultats théoriques, et ne trouvant pas de contenu approprié pour les 40 dernières.

Tableau 2. Mise en valeur des différents types de littérature existante

	Emis.			Energ.			Mat.			Déf.			Eau		
	L	F	G	L	F	G	L	F	G	L	F	G	L	F	G
Lean															
SS															
LSS															
Agile															
I4.0															
I5.0															

Légende : Bleu pour les études de cas, rouge pour les seules études théoriques et blanc pour l'absence de littérature

Cette revue de littérature montre que la littérature scientifique combinant techniques industrielles, développement durable et industries de la mode et du luxe est moins nombreuse et complète que celle portant sur l'industrie du textile ou de l'habillement. Il peut y avoir une variété d'explications à cela, pouvant inclure : le fait que les industries de la mode et du luxe pourraient être moins matures sur les sujets manufacturiers que l'industrie du textile et de l'habillement, le fait que la mode et le luxe pourraient ne pas être autant étudiés par les chercheurs, ou encore qu'elles auraient un potentiel d'efficience industrielle plus bas du fait de leur taux élevé de nouveauté, entre autres explications probables. Pour l'industrie du luxe, plus artisanale et composée majoritairement de PME pour la partie manufacturière, ces hypothèses sont d'autant plus crédibles. Une autre explication pour l'industrie de la mode, ayant été corroborée par certains articles, est que les termes habillement, textile et mode sont souvent utilisés de manière interchangeable, rendant donc difficile ce type de nuance.

De manière similaire, comme démontré par le nombre de combinaisons impact/méthode industrielle menant à une réduction d'impact environnemental identifiés par le présent article, il **existe un potentiel démontré pour l'utilisation de méthode d'efficience industrielle dans l'industrie textile dans un objectif de performance environnementale**. De plus, le potentiel environnemental établi du lean dans les industries de la mode et du luxe semble indiquer qu'une situation similaire pourrait exister dans ces industries.

Tout cela montre un besoin de recherches supplémentaires sur l'utilisation de méthodes industrielles dans un objectif de

performance environnementale dans les industries de la mode et du luxe. Cela pourrait se faire à travers de la **recherche-intervention, où le chercheur pourrait être simultanément acteur et observateur de programmes de transformation industrielle similaires dans plusieurs usines**. Ces usines pourraient différer par leur gamme de produit, leur typologie de produit, leur pays d'implantation, leur taille, leur structure organisationnelle et actionnariale, la variété de leurs clients, ou encore d'autres facteurs. Ces variations pourraient ensuite permettre d'analyser les facteurs de réussite dans l'application de telles méthodes, ainsi que montrer un ensemble de situations dans lesquelles ces méthodes seraient efficaces.

D'autre part, on peut observer que certains types d'impacts environnementaux ont été étudiés de manière plus aboutie que d'autres. Par exemple, **alors que les améliorations en termes de qualité et de déchets ont été étudiées dans le textile comme dans la mode pour la quasi-totalité des méthodologies testées, leur potentiel d'impact sur la consommation ou la qualité de l'eau est très rarement étudié**. Alors que la raréfaction de la ressource en eau est une problématique de premier ordre dans certaines parties du monde et va continuer à s'intensifier dans le monde entier, ce sujet mériterait particulièrement à être étudié de manière plus détaillée.

De plus, **l'absence presque totale d'études de cas complètes et fiables pour l'Industrie 4.0 et l'Industrie 5.0**, malgré un corpus théorique extensif, indique un besoin d'études de terrain. Ces dernières pourraient prendre la forme de recherche transformative à travers de la recherche-intervention, permettant donc de contribuer à la connaissance pendant que ces nouveaux paradigmes industriels se déploient dans les usines.

En outre, le manque de littérature académique couvrant les méthodes de production agiles et leur impact environnemental, ajouté aux indications de certains papiers de recherche existants, semble indiquer que l'agilité et la soutenabilité sont vues soit comme des sujets sans lien, soit comme des forces opposées. Etant donné que l'Industrie 5.0 possède à la fois la résilience et la soutenabilité comme piliers, et que la résilience est un aspect clé de l'agilité, cela montre une opportunité de réconcilier cette tension et combiner ces deux aspects, ce qui serait une autre raison pour s'engager dans de la recherche-intervention sur l'Industrie 5.0.

Enfin, certains articles ont mis en exergue l'interaction entre responsabilité sociale et méthodes manufacturières, à la fois sous le prisme du **potentiel de ces méthodes pour engendrer un impact social, et du besoin d'engagement des travailleurs et de développement de leurs compétences** afin de mettre lesdites méthodes en place. De manière notable, Glogar et al. [2025] mettent en évidence le rôle critique des compétences et du niveau de connaissance des ouvriers dans le déploiement de l'Industrie 4.0, ce qui implique que l'implémentation de l'Industrie 4.0 demanderait de la formation et résulterait donc en l'autonomisation et la prise d'initiative par les travailleurs [Voegtlin et al., 2015]. De même, Melosi et al. [2018] démontre que la cartographie des compétences et la formation peuvent participer à réduire l'empreinte environnementale de la production industrielle. Etant donné que cela correspond notamment aux travaux de Karaosman et al. [2017], il pourrait être intéressant d'étudier l'interaction entre implémentation de méthodes industrielles, facteurs humains et responsabilité sociale dans les industries de la mode et du luxe.

5 CONCLUSION ET LIMITES

Un cadre d'analyse de l'état de la connaissance académique sur 6 méthodes industrielles (Lean, Six Sigma, Lean Six Sigma, méthodes agiles, Industrie 4.0 et Industrie 5.0), appliquées aux industries du luxe, de la mode, du textile et de l'habillement, ainsi que 5 types et sources d'impacts environnementaux (émissions, énergie, matériaux, défauts et eau) a été présenté et mis en application.

Sur les 90 intersections méthode/industrie/impact étudiées, 50 étaient couvertes par 24 documents sélectionnés comme pertinents. 40 intersections méthode/industrie/impact, correspondant à des lacunes dans la recherche ont également été identifiées.

Le besoin de recherche, et notamment de recherche-intervention et d'études de cas dans les industries de la mode et du luxe sur l'utilisation de méthodes d'efficience industrielle dans un objectif de performance environnementale a été établi. Parmi les perspectives les plus prometteuses, on trouve notamment les études de cas sur l'Industrie 4.0 et l'Industrie 5.0 dans l'environnement manufacturier de l'industrie de la mode et du luxe. Il a également été identifié un intérêt à étudier le potentiel des méthodes d'efficience industrielle spécifiquement pour la réduction de la consommation d'eau dans le luxe, la mode et le textile. La relation entre l'engagement des travailleurs, la gestion du changement et l'implémentation de méthodes industrielles mérite également d'être étudiée.

Une des principales limites de cette étude est que la recherche n'a été effectuée qu'en langue anglaise sur deux moteurs de recherche. De plus, de nombreuses méthodes industrielles n'y ont pas été incluses et le cadre d'analyse se concentre au niveau des méthodes sans descendre au niveau des pratiques les composant. Enfin, de nombreuses pratiques ayant lieu sur le terrain dans les industries de la mode et du luxe ne remontent pas dans la littérature scientifique pour un ensemble de raisons.

6 REFERENCES

Abbes, N., Sejri, N., Chaabouni, Y., & Cheikhrouhou, M. (2018). Application of Six Sigma in Clothing SMEs: A case study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 460*(012009).

Al Amin, M., Chakraborty, A., & Baldacci, R. (2025). Industry 5.0 and green supply chain management synergy for sustainable development in Bangladeshi RMG industries. *Cleaner Logistics and Supply Chain, 14*.

Alie, S., & Sarjono, H. (2022). Implementation of Lean Six Sigma in Textile Industry: A Systematic Literature Review. *Proceedings of the 3rd South American International Industrial Engineering and Operations Management Conference, Asuncion, Paraguay, July 19-21, 2022.*

Barata, J., & Kayser, I. (2023). Industry 5.0 - Past, Present and Near Future. *Procedia Computer Science, 219*, 778-788.

Bilancia, A., Costa, F., & Staudacher, A. (2024). Sustainable Lean Practices in the Luxury Fashion Industry: A Case Study. *Thürer, M., Riedel, R., von Cieminski, G., Romero, D. (eds) Advances in Production Management Systems. Production Management Systems for Volatile, Uncertain, Complex, and Ambiguous Environments. 730.* Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-031-71629-4_11

Bilancia, A., Costa, F., & Staudacher, A. P. (2025). Achieving sustainability and circular economy in the luxury fashion industry through lean practices: a systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*. doi:10.1016/j.cie.2025.111107

Caballero-Morales, S.-O., Cuautle-Gutierrez, L., Cordero-Guridi, J.-d.-J., & Alvarez-Tamayo, R.-I. (2023). Six-Sigma Reference Model for Industry 4.0 Implementations in Textile SMEs. *Sustainability, 15*(16).

Dagne, T. (2023). Productivity Improvement Through Customized Lean and Six Sigma for Garment Manufacturing Industries. *Journal of Optimization in Industrial Engineering, 16*(1), 9-17. doi:10.22094/joie.2022.1904036.1763

De-la-Flor, A., Vigil, M., & Ruiz-Ruiz, M. F. (2024). Improvement of the sustainable performance in a textile company using the lean-green methodology. *International Journal of Production Management and Engineering, 12*(1), 105-116.

Dinulescu, R., & Dima, A. (2019). Improving Performance in Romanian Garment Industry by Using the Lean Six Sigma Methodology. *Conference: THE 13th INTERNATIONAL MANAGEMENT CONFERENCE "Management Strategies for High Performance".* Bucharest, Romania.

Donzé, P.-Y., & Fujioka, R. (2017). Introduction. In P.-Y. Donzé, & R. Fujioka, *Global Luxury* (pp. 1-15). Singapore: Palgrave.

Fibriani, L., Garside, A., & Amallynda, I. (2023). Lean Six Sigma Approach to Improve the Production Process in the Garment Company: A Case Study. *Journal of engineering and Management in Industrial System, 11*(2), 153-168.

Gazzola, P., Grechi, D., Iliashenko, I., & Pezzetti, R. (2024). The evolution of digitainability in the fashion industry. *Kybernetes, 53*(13), 101-126.

Glogar, M., Petrak, S., & Naglic, M. (2025). Digital Technologies in the Sustainable Design and Development of Textiles and Clothing—A Literature Review. *Sustainability, 17*(4).

Hussain, T., Jamshaid, H., & Sohail, A. (2014). Reducing defects in textile weaving by applying Six Sigma methodology: a case study. *International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage, 8*(2), 95-104.

IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)].* Geneva, Switzerland: IPCC. doi:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

Jiju, A., Snee, R., & Hoerl, R. (2017). Lean Six Sigma: Yesterday, Today and Tomorrow. *International Journal of Quality and Reliability Management, 34*(7), 1073-1093.

Kankariya, P., & Valase, K. (2017). Performance improvement in Garment industries by reducing defects using six sigma methodologies. *Internation Journal of Scientific Research Engineering & Technology (IJSRET), 6*(3), 228-236.

Karaosman, H., Brun, A., & Morales Alonso, G. (2017). Environmental and social impact-free stance and consequences on the operational performance. *Journal of Textile Engineering and Fashion Technology, 1*(4), 153-163.

Karthi, S., Devadasan, S., Selvaraju, K., Sivaram, N., & Sreenisava, C. (2013). Implementation of Lean Six Sigma through ISO 9001:2008 based QMS: a case study in a textile mill. *Journal of the Textile Institute, 104*(10), 1089-1100. doi:10.1080/00405000.2013.774945

Kurnia, H., Jaqin, C., Purba, H., & Setiawan, I. (2021). Implementation of Six Sigma in the DMAIC Approach for Quality Improvement in the Knitting Socks Industry. *Tekstil ve Mühendis, 28*(124), 269-278.

Kurnia, H., Tumanggor, O., & Jaqin, C. (2021b). Lean Six Sigma: Literature Review and Implementation for Textile and Textile Product (TTP) Industries. *3rd Mercu Buana Conference on Industrial Engineering - MBCIE 2021*.

Lemieux, A.-A., Pellerin, R., Lamouri, S., & Carbone, V. (2012). A new analysis framework for agility in the fashion industry. *International Journal of Agile Systems and Management , 5*(2), 175-197.

Lv, D., & Cho, E. (2024). Carbon-zero agility: Enabling carbon-zero organizations through agile management and ambiguous feedback algorithms. *Environmental Modelling and Software, 177*.

Melosi, F., Campana, G., & Cimatti, B. (2018). Competences Mapping as a Tool to increase Sustainability of Manufacturing Enterprises. *Procedia Manufacturing, 21*, 806-813.

Montgomery, D., & Woodall, W. (2008). An Overview of Six Sigma. *International Statistical Review, 76*(3), 329-246.

Mridha, J., Hasan, S., Shahjalal, M., & Ahmed, F. (2019). Implementation of Six Sigma to Minimize Defects in Sewing Section of Apparel Industry in Bangladesh. *Global Journal of Researches in Engineering: J, 19*(3).

Nupur, R., Gandhi, K., Solanki, A., & Jha, P. (2018). Six Sigma Implementation in Cutting Process of apparel Industry. (P. K. Kapur, Ed.) *Quality, IT and Business Operations*.

Ohno, T., & Bodek, N. (2019). *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production.* Productivity Press.

Ranfagni, S., & Ozuem, W. (2022). Luxury and Sustainability: Technological Pathways and Potential Opportunities. *Sustainability, 14*(9).

Riva, C., Valsecchi, G., Cagliano, R., & Canterino, F. (2020). *Master Thesis - Luxury Manufacturing 4.0: Keeping Craftsmanship alive in the 4th Industrial Revolution.* Politecnico Milano.

Serdari, T. (2020). Defining Fashion, Luxury, and Luxury Fashion. In *Rethinking Luxury Fashion* (pp. 3-7). Palgrave Advances in Luxury. Palgrave Macmillan, Cham.

Shah, A. (2024). Improvement in condensate recovery for energy conservation using six sigma methodology in a textile industry. *Master's thesis at National University of Sciences and Technology, Islamabad*.

Textile Exchange. (2025). *Materials Market Report 2024.*

Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. *British Journal of Management, 14*(3), 207-222.

Uddin, S., & Rahman, C. (2014). Minimization of Defects in the Sewing Section of a Garment Factory through DMAIC Methodology of Six Sigma. *Research Journal of Engineering Sciences, 3*(9), 21-26.

Van Erp, T., Pereira Carvalho, N., Gerolamo, M., Gonçalves, R., Rytter, N., & Gladysz, B. (2024). Industry 5.0: A new strategy framework for sustainability management and beyond. *Journal of Cleaner Production, 461*.

Vanacker, H., Lemieux, A.-A., & Bonnier, S. (2022). Different dimensions of durability in the luxury fashion industry: An analysis framework to conduct a literature review. *Journal of Cleaner Production, 377*.

Voegtlin, C., Boehm, S., & Bruch, H. (2015). How to empower employees: using training to enhance work units' collective empowerment. *International Journal of Manpower, 36*(3), 354-373.

Liste des auteurs

Aallaoui Soufiane, 261–267
Aarab Hassan, 456–463
Abbassi Ali, 166–172
Abdelhak Elidrissi, 225
Abdul Nour Georges, 133–139, 386–393
Afsar H. Murat, 173
Afsar Hasan Murat, 318
Agard Bruno, 125–132
Aghelinejad Mohammadmohsen, 401, 402
Aguir Mohamed Salah, 195–200
Aissaoui Najla, 248–253
Alberti Pascal, 378–385
Allaoui Hamid, 278–285
Alpan Gulgun, 201–208
AmergÉ Cyril, 40–47
Amodeo Lionel, 241–247, 269, 319, 320, 401, 402
Aouam Tarik, 174–181
Argotti Yann, 84, 85
Assemlali Salwa, 287–294
Attajer Ali, 302
Audy Jean-François, 270–277, 310–317
Azzabi Lotfi, 111–117
Azzamouri Ahlam, 261–267
Aït-Kadi Daoud, 431–438

Bahria Nadia, 394–400, 464–472
Baret Isaline, 254–259
Baron Claude, 84, 85
Beghin Clément, 234–240
Bejaoui Mayssa, 125–132
Belhouideg Soufiane, 101, 102
Belkadi Farouk, 40–47
Belloumi Manel, 394–400
Belmouadden Mustapha, 227–233
Ben Brahem Asma, 103–110
Ben Khalifa Mariem, 424–430
Ben Mabrouk Amel, 195–200
Ben Mabrouk Amira, 195–200
Ben Rais Lasram Frida, 278–285
Ben-Ammar Oussama, 189–194
Benali Maha, 424–430
Berbere Rihem, 303–309
Berrah Lamia, 86–93, 270–277, 403–410, 419–423
Berruet Pascal, 411–418
Besson Franck, 142–149
Bettayeb Belgacem, 142–149
Bhar Layeb Safa, 248–253, 303–309
Billaut Jean-Charles, 362
Billon-Denis Emmanuelle, 234–240
Blaise Léa, 260
Blouin Florence, 270–277
Blua Philippe, 241–247
Borodin Valeria, 140, 141
Boudaoud Nassim, 118–124
Boukerrouis Imane, 173
Bourdin Mathieu, 226
Bousquet Mathieu, 365–367
Brice Nelain, 140, 141

Caillaud Emmanuel, 419–423
Callico Adrien, 362
Chaabane Amin, 439–447, 464–472
Chabane Yahia, 69–76
Charbonneau-Genest Marie, 18–25
Chargui Tarik, 354–360
Chelbi Anis, 195–200
Cheutet Vincent, 62–68
Chokri Hamza, 278–285
Chouraqui Marc, 241–247
Citroën Côme, 473–479
Cliville Vincent, 86–93
Cloutier Caroline, 321–328
Crasci Nathalina, 303–309
Cruz Garcia Nuno, 217–224
Côté Alain, 133–139

D'arrentières Frédéric, 378–385
Da Cunha Catherine, 234–240
Dadouchi Camelia, 103–110, 209–216, 227–233, 303–309
Danjou Christophe, 2–9, 62–68, 77–83, 182–188
Darlay Julien, 338
David Pierre, 217–224
Della Croce Federico, 165
Demba Harouna, 142–149

Deschamps Cyril, 303–309
Desport Pierre, 362, 363
Diago Miguel, 133–139
Dieulle Laurence, 158
Divry Christine, 378–385
Drissi Elbouzidi Adnane, 346–353
Drouard Vincent, 69–76
Duclos Audrey, 234–240
Duhamel Christophe, 361
Dujardin Yann, 166–172
Dupuis Ambre, 182–188

El Gomri RabiÎ, 337
El Mhamedi Abderrahman, 337
Elhachemi Nizar, 174–181
Elmarkez Ahmed, 411–418
Esmaeiliqeshlaqi Maryam, 201–208
Evans Steve, 473–479
Eynard Benoît, 370–377

Farhat Nessrine, 217–224
Fenies Pierre, 364
Ferjani Nassif, 295–301
Fleury Gérard, 159–164
Forget Pascal, 310–317
François Véronique, 365–367
Fromont Emmanuelle, 286

Gaha Raoudha, 370–377
Gailly Benjamin, 142–149
Gamache Sébastien, 18–25
Gardiner Paul, 378–385
Gaudreau Marc-André, 310–317
Germanos Manuella, 189–194
Gharbi Ali, 456–463
Gidel Thierry, 378–385
Godichaud Matthieu, 318–320
Goepp Virginie, 419–423
Gosselin Louis, 448–455
Goujon Alexandre, 26–32
Gourdin Eric, 166–172
Guerre-Chaley Frédéric, 403–410
Guezzi Abdelhak, 286

Hajji Adnène, 431–438
Hamzaoui Mohammed Adel, 48–55
Hari Gautam Shuva, 329–336
Hmina Nabil, 101, 102
Hnaien Faicel, 140, 141, 268
Homayouni Zahra, 321–328
Hoogeveen Han, 165
Hoogeven Jippe, 165
Hrouga Mustapha, 56–61

Ihrouchen Zineb, 34–39
Inghels Clara, 234–240

Jahani Niloofar, 329–336
Jaoua Amel, 424–430
Jaoui Nadia, 174–181
Jemai Zied, 268
Joblot Laurent, 2–17
Jodeau Claire, 77–83
Jouini Oualid, 94–100
Julien Nathalie, 48–55

Kaabar Mohamed Yassine, 248–253
Kammoun Karim, 111–117
Kergosien Yannick, 363
Kobi Abdessamad, 111–117
Ktari Bacem, 439–447

Labadie Nacima, 158
Lacomme Philippe, 159–164, 166–172
Lagache Manuel, 101, 102
Lagrat Ismail, 337
Lajnef Najd, 394–400
Lamouri Samir, 26–32, 226, 346–353
Laouini Oumayma, 268
Larbi Rim, 439–447, 464–472
Laroche Florent, 40–47
Laval Jannik, 62–68
Le Duigou Julien, 370–377
Lebel Luc, 321–336
Legros Benjamin, 94–100
Lehoux Nadia, 321–328, 339–345, 448–455
Lemieux Andree-Anne, 473–479
Louis Anne, 142–149

Magnani Florian, 2–17, 26–32
Magnet Franck, 86–93
Makboul Salma, 241–247
Marconnet Bertrand, 370–377
Meango Toualith Jean-Marc, 133–139
Mecheri Boubakeur, 302
Mejri Imen, 248–253
Mesli-Kesraoui Soraya, 411–418
Metivier Lionel, 69–76
Mezatio Eric Papain, 401, 402
Mimouni Fayçal, 337
Monica-Juliana Perez, 354–360
Montalbano Pierre, 363
Montoya-Torres Jairo R., 269
Moreira De Oliveir Adaiton, 125–132
Moreno Haro Luis Miguel, 125–132
Movahedkhah Mahdi, 201–208

Naddam Reda, 84, 85
Nakache Lise, 364
Nefzi Meriam, 431–438
Neumann Anas, 226
Nguemaleu Tchangoue Éliane Audrey, 448–455
Nguyen Hong-Nguyen, 319, 320
Nguyen Nhan Quy, 254–259
Nouaouri Issam, 278–285
Noureddine Rachid, 118–124
Nourelfath Mustapha, 150–157

Oquendo Flavio, 411–418
Ouazene Yassine, 254–259, 318
Ouhimmou Mustapha, 456–463

Paillet Michel, 40–47
Parrenin Loic, 182–188
Passalacqua Mario, 10–17
Paviot Thomas, 226
Payette Mathieu, 133–139
Pellerin Robert, 2–17, 26–32, 226–233, 303–309, 346–353
Penz Louise, 361
Peña Diana A., 269
Ploton Olivier, 165
Pourkarim Guilani Pardis, 150–157
Prodhon Caroline, 166–172, 362

Ren Libo, 261–267, 364
Rifi Leah, 217–224
Robbes Alexis, 365–367
Rokh Mohamed Arbi, 464–472
Rosin Frédéric, 10–17, 26–32, 346–353
Roy Marc-Antoine, 386–393
Rönnqvist Mikael, 339–345

Sabar Mohamed, 287–294
Sadji Fares, 118–124
Sahnoun M'hammed, 142–149
Said Dhaou, 56–61
Saiem Malak, 140, 141
Salem Nafiri, 225
Samine Sara, 101, 102
Samuel Chloe, 310–317
Sanlaville Éric, 361
Schau Quentin, 165
Seraidarian Fabien, 378–385
Serrou Driss, 337
Servoz Laurie, 86–93
Shahidi Asudeh, 339–345
Slama Ilhem, 268
Smati Meriem, 62–68
Snoussi Hichem, 140, 141
Souissi Omar, 34–39
Soukhal Ameur, 363
Sow Dahibou Fall, 33

T'kindt Vincent, 165
Tahan Souheil-Antoine, 125–132
Tchernev Nikolay, 261–267
Tchoffa David, 337
Trentesaux Damien, 354–360, 403–410
Trignol Aurélie, 234–240
Trochu Julien, 439–447
Tu Yimiao, 370–377

Vadeboncoeur Dominic, 2–9
Viaron Kimberley, 48–55
Vo Thi Le Hoa, 286
Vu Hai Canh, 118–124

Wu Bin, 158

Yahia Esma, 209–216
Yahiaoui Ala-Eddine, 368, 369
Yahiaoui Reda, 118–124
Yahouni Zakaria, 201–208
Yalaoui Alice, 173, 241–247
Yalaoui Farouk, 241–247, 254–259
Yang Kaiyue, 94–100
Yazdanpourmoghadam Samira, 209–216

Zacharewicz Grégory, 189–194
Zahout Boukhalfa, 69–76
Zemzami Maria, 101, 102
Zouagha Houda, 111–117