UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

PLANIFICATION AVANCÉE DES TOURNÉES DE VÉHICULES DE BALAYAGE PRINTANIER, INNOVATION TECHNOLOGIQUE ET MARCHÉS PUBLICS VERTS

THÈSE PRÉSENTÉE
COMME EXIGENCE PARTIELLE DU

DOCTORAT EN ADMINISTRATION
OFFERT CONJOINTEMENT PAR
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES ET
L'UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

PAR
AMENI KRAIEM

Juillet 2026

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

École de gestion

Planification avancée des tournées de véhicules de balayage printanier, innovation technologique et marchés publics verts

Ameni Kraiem

Cette thèse a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes :

Pascal Forget	Président du jury
Jean-François Audy	Directeur de recherche
Amina Lamghari	Co-directrice de recherche
Yasmina Maïzi	Examinatrice externe
Luis Antonio de Santa-Eulalia	Représentant de l'UdeS

SOMMAIRE

Cette thèse porte sur l'amélioration des opérations de balayage printanier des abrasifs routiers, un service saisonnier essentiel à la sécurité routière et fortement exposé à la concurrence lors des appels d'offres publics. Dans la pratique, les entreprises spécialisées, comme l'entreprise de résidence Arseno Balayage, réalisent encore la planification des opérations de manière manuelle, en s'appuyant principalement sur l'expérience du gestionnaire. Cette approche engendre des plans souvent inefficients, des estimations imprécises des durées et des coûts, ainsi qu'un risque accru de pénalités de retard et de perte de compétitivité. Au-delà de cette problématique opérationnelle, la thèse aborde deux enjeux stratégiques majeurs. D'une part, elle vise à éclairer les décisions d'investissement en recherche et développement (R&D) pour améliorer l'efficience opérationnelle. D'autre part, elle s'intéresse à l'éventuelle transition du secteur vers un marché intégrant des considérations environnementales, notamment en matière d'émissions de gaz à effet de serre (GES), en analysant les implications économiques associées à l'évaluation de la performance environnementale.

L'objectif général de cette recherche est de développer un cadre intégré d'aide à la décision permettant d'améliorer la performance opérationnelle, économique et environnementale des services de balayage printanier. Plus précisément, la thèse poursuit trois objectifs complémentaires : optimiser la planification des opérations afin de minimiser la durée totale et les coûts opérationnels, quantifier les gains escomptés par un investissement en R&D sur un projet d'innovation technologique, et proposer un cadre analytique de marchés publics verts permettant d'évaluer le surcoût pour l'octroi d'un contrat à un fournisseur éco-innovant par rapport aux fournisseurs-compétiteurs.

La méthodologie adoptée repose sur une approche quantitative en recherche opérationnelle et en modélisation analytique. Un modèle mathématique est d'abord formulé sous la forme d'un programme linéaire inspiré du problème de tournées de véhicules, intégrant les contraintes spécifiques des appels d'offres publics. Afin de rendre son utilisation compatible avec des contextes réels, une méthode de résolution combinant une heuristique et une métaheuristique est développée pour générer des plans de balayage efficients dans des délais de calcul raisonnables. Cet outil de planification est ensuite mobilisé pour analyser les retombées opérationnelles et économiques d'un projet d'innovation dans une brosse de balayage, en simulant différents scénarios d'augmentation de la vitesse de balayage afin de quantifier les gains potentiels en durée, en coûts et en nombre de quarts de travail. Par ailleurs, des modèles de consommation de carburant, d'émissions de GES et de coûts opérationnels sont développés pour chacun des deux systèmes de balayage, le système classique représentant l'offre concurrentielle du marché, tandis que le système innovant, constituant une éco-innovation en raison de ses émissions de GES réduites, est unique au prestataire de service. Enfin, des modèles de marchés publics verts sont élaborés afin d'évaluer quantitativement la performance environnementale de ces systèmes et de déterminer le minimum de surcoût requis pour que le système innovant soit compétitif dans un processus d'adjudication par rapport au système classique.

Les résultats montrent qu'une planification avancée permet de réduire significativement la durée des opérations, le nombre de quarts de travail et les coûts, tout en améliorant la capacité du prestataire à soumettre des prix compétitifs. L'analyse montre également que l'innovation dans les brosses constitue un levier direct d'amélioration de l'efficience opérationnelle des opérations de balayage. En quantifiant les réductions de durée et de coûts associées à une augmentation de la vitesse de balayage, la recherche fournit une base objective pour appuyer les décisions d'investissement en R&D et définir les spécifications techniques cibles des futures brosses. Sur le plan environnemental, les modèles proposés permettent d'estimer de manière rigoureuse les émissions de GES de chaque système et de déterminer, dans

différents scénarios de marchés publics verts, le surcoût pour l'octroi d'un contrat à un fournisseur éco-innovant par rapport aux fournisseurs-compétiteurs.

Cette thèse contribue à une meilleure compréhension des interactions entre la planification des opérations, l'innovation technologique et la performance environnementale dans le secteur du balayage printanier. Elle propose un cadre analytique intégrant la planification avancée des opérations, l'évaluation économique des gains associés à une éco-innovation et la formalisation de modèles de marchés publics verts adaptés à ce contexte. Les résultats fournissent aux prestataires de services des repères quantifiés pour améliorer la préparation des soumissions, appuyer les décisions d'investissement en R&D et anticiper sa compétitivité selon l'évolution des critères environnementaux dans les appels d'offres. Elle permet également aux autorités publiques d'analyser la dynamique du surcoût associé à la rémunération de la performance environnementale en fonction des modèles de marchés publics verts et de leur paramétrisation.

RÉSUMÉ

Les opérations de balayage printanier des abrasifs routiers reposent encore sur des pratiques de planification manuelles, entraînant des inefficiences opérationnelles et des coûts élevés. À ces enjeux opérationnels s'ajoutent des défis stratégiques liés, d'une part, à l'évaluation des gains associés aux décisions d'investissement en recherche et développement (R&D) visant à améliorer l'efficience des opérations, et, d'autre part, à l'analyse de la transition potentielle du secteur vers un marché intégrant davantage de considérations environnementales, notamment en matière d'émissions de gaz à effet de serre (GES), ainsi que des implications économiques liées à l'évaluation de la performance environnementale. Cette étude propose un cadre intégré d'aide à la décision visant à améliorer la performance opérationnelle, économique et environnementale de ces opérations. Un modèle de planification des tournées est formulé en programmation linéaire et résolu via des heuristiques et des métaheuristiques adaptées au contexte opérationnel réel. Le cadre est ensuite étendu à l'évaluation des gains associés à une innovation en brosses de balayage plus performantes, à travers des scénarios de variation de la vitesse. Il est également utilisé pour modéliser les coûts, la consommation énergétique et les émissions de GES pour deux systèmes de balayage : un système classique, représentatif de l'offre concurrentielle du marché, et un système innovant, constituant une éco-innovation en raison de ses émissions de GES réduites et unique au prestataire de service. Enfin, des modèles de marchés publics verts sont développés pour évaluer la performance environnementale et déterminer le surcoût associé à l'éco-innovation. Les résultats montrent que l'optimisation de la planification et l'innovation technologique améliorent significativement l'efficience opérationnelle et réduisent les coûts et émissions, tout en fournissant des bases quantitatives pour la prise de décision en R&D et en politiques d'achats publics.

Mots clés : planification des tournées de véhicules; optimisation; innovation technologique; efficience opérationnelle; marchés publics verts; émissions de GES.

ABSTRACT

Street sweeping operations are still largely based on manual planning practices, resulting in operational inefficiencies and high costs. Beyond these operational issues, strategic challenges arise from, on the one hand, the assessment of gains associated with research and development (R&D) investment decisions aimed at improving operational efficiency, and, on the other hand, the analysis of the sector's potential transition toward a procurement that increasingly incorporates environmental considerations, particularly greenhouse gas (GHG) emissions, as well as the economic implications related to the evaluation of environmental performance. This study develops an integrated decision-support framework aimed at improving the operational, economic, and environmental performance of these operations. A routing model is formulated as a linear programming problem and solved through heuristics and metaheuristics tailored to real operational contexts. The framework is then extended to assess the potential gains of brush innovation through sweeping speed improvement scenarios. It is also used to model costs, energy consumption, and GHG emissions for two sweeping systems: a conventional system representative of the competitive market, and an innovative system, constituting an eco-innovation due to its reduced GHG emissions, that is unique to the service provider. Finally, green public procurement models are developed to evaluate environmental performance and determine the additional cost associated with the eco-innovation. The results indicate that optimized planning and technological innovation significantly enhance operational efficiency while reducing costs and emissions, providing quantitative evidence to support R&D investment decisions and green public procurement policies.

Keywords: vehicle routing problem; optimization; technological innovation; operational efficiency; green public procurement; greenhouse gas emissions.

TABLES DES MATIÈRES

SOMMAIRE **3**

RÉSUMÉ **6**

ABSTRACT **7**

LISTE DES TABLEAUX **12**

LISTE DES FIGURES **13**

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES **14**

REMERCIEMENTS **15**

INTRODUCTION **17**

PREMIER CHAPITRE-PROBLÉMATIQUE MANAGÉRIALE **25**

1.1 PROCESSUS ACTUEL D'ATTRIBUTION D'UN CONTRAT ET EXIGENCES ADMINISTRATIVES ET TECHNIQUES 25

1.1.1 Le processus actuel d'attribution d'un contrat 25

1.1.2 Les exigences administratives et techniques 27

1.2 ENJEUX DE LA PLANIFICATION DES OPÉRATIONS DE BALAYAGE PRINTANIER 30

1.3 INNOVATION DANS LES BROSSES DE BALAYAGE : DÉCISIONS D'INVESTISSEMENT ET EFFICIENCE OPERATIONNELLE 31

1.4 ENJEUX DES MARCHÉS PUBLICS VERTS 32

1.5 OBJECTIFS ET QUESTIONS DE RECHERCHE 34

DEUXIÈME CHAPITRE-LE CONTEXTE THÉORIQUE **38**

2.1. APERÇU SUR LE PROBLÈME DE TOURNÉES DE VÉHICULES 38

2.1.1. Définition et formulation du problème de tournées de véhicules 38

2.1.2. Les principales variantes du problème de tournées de véhicules 41

2.1.3. Différences et similitudes entre notre problème et les travaux existants 42

2.2. LES MÉTHODES DE RÉSOLUTION DES PROBLÈMES DE TOURNÉES DE VÉHICULES 46
2.2.1. Les algorithmes génétiques 46
2.2.2. La recherche tabou 48
2.2.3. La recherche à voisinage variable 49
2.2.4. La recherche adaptative à grand voisinage 50
2.3. INNOVATION AU NIVEAU DES PME 55
2.3.1. Définition de l'innovation et ses différents types 55
2.3.2. Les limites liées à l'innovation 58
2.3.3. Aspects techniques et opérationnels des brosses de balayage 61
2.4. LES MARCHÉS PUBLICS VERTS 66
2.4.1. Les critères environnementaux au niveau des marchés publics verts 66
2.4.2. Les catégories de marchés publics verts 69
2.4.3. Impact des marchés publics verts sur l'éco-innovation 79
2.5. CADRE CONCEPTUEL 85

TROISIÈME CHAPITRE-LE CADRE OPÉRATOIRE 87

3.1. LE DESIGN SCIENCE 87
3.2. APPROCHE DE RAISONNEMENT 94
3.3. STRATÉGIE DE RECHERCHE 95
3.4. COLLECTE ET ANALYSE DE DONNÉES 95
3.4.1. Observation du contexte opérationnel et échanges avec le partenaire industriel 96
3.4.2. Collecte et analyse des appels d'offres 100
3.4.3. Identification des contraintes 103
3.4.4. Construction de l'échantillon des appels d'offres 104
3.5. TRAITEMENT DES DONNÉES COLLECTÉES 105
3.5.1. Préparation des bases de données 105
3.5.2. Traitement des données historiques de géolocalisation 106
3.6. CRITÈRES D'ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DE RECHERCHE 107
3.8.4. Généralisabilité 107

3.6.2. Validité 108
3.7. LA MÉTHODE DE RÉSOLUTION DU PROBLÉME DE TOURNÉES DE VÉHICULES DE BALAYAGE 111
3.7.1. Modélisation mathématique 111
3.7.2. Description de la métaheuristique 112
3.8. DÉMARCHE D'ÉVALUATION PROSPECTIVE D'UNE INNOVATION TECHNOLOGIQUE 124
3.8.1. Planification des tests numériques 125
3.8.2. Exécution des tests numériques 126
3.8.3. Analyse des résultats 128
3.9.1. Projection des gains et soutien à la décision d'investissement 129
3.9. MODÉLISATION DES MPV 130
3.9.1. Formulation des modèles de MPV 133
3.9.2. Détermination des surcoûts 138
3.9.3. Formulation des modèles d'émissions de GES 143

QUATRIÈME CHAPITRE-ARTICLES DE LA THÈSE 147

4.1. ARTICLE 1 147
4.2. ARTICLE 2 196
4.3. ARTICLE 3 235

CINQUIÈME CHAPITRE-DISCUSSION GÉNÉRALE DES RÉSULTATS, LIMITES ET PISTES DE RECHERCHES FUTURES 273

5.1. DISCUSSION DES RÉSULTATS DE LA RECHERCHE 273
5.1.1. Planification des opérations de balayage 273
5.1.2. Décisions d'investissement en innovation technologique et efficience opérationnelle 275
5.1.3. Marchés publics verts et éco-innovation 277
5.2. CONTRIBUTIONS MÉTHODOLOGIQUES 280
5.2.1. La méthode de résolution de RAGV et les opérateurs 280
5.2.2. Innovation technologique 281
5.2.3. Formalisation des marchés publics verts 282
5.3. CONTRIBUTIONS MANAGÉRIALES 283

5.4. LES LIMITES DE LA RECHERCHE ET PISTES DE RECHERCHES FUTURES 285

CONCLUSION 290

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 292

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. 1 Exemples d'exigences administratives et techniques du service de balayage 28
Tableau 1. 2 Synthèse des enjeux et solutions 35
Tableau 1. 3 Synthèse des liens entre les objectifs, les questions de recherche et les articles de la thèse 37
Tableau 2. 1 Les principales similarités et différences entre notre problème et les travaux présentés dans la littérature 44
Tableau 2. 2 Principaux travaux de MDVRP 53
Tableau 2. 3 Synthèse des travaux sur l'innovation dans le service du balayage 64
Tableau 2. 4 Boîte à outils des marchés publics verts développée par Commission Européenne (2021) 67
Tableau 2. 5 Les différentes catégories identifiées dans un marché public vert 70
Tableau 2. 6 Survol d'études sur les aspects opérationnels d'un MPV 76
Tableau 3. 1 Les étapes de la recherche en design science 92
Tableau 3. 2 Méthodes d'acceptation d'une solution 114
Tableau 3. 3 Liste des opérateurs selon Ropke et Pisinger (2006) 118
Tableau 3. 4 Détails des coûts fixes et variables 127
Tableau 3. 5 Classification et analyse critique des MPV 131
Tableau 3. 6 Les différents paramètres utilisés au niveau des MPV 137
Tableau 3. 7 Les modèles de consommation de carburant 144

LISTE DES FIGURES

Figure 1. 1 Processus d'octroi d'un contrat selon le Secrétariat du Conseil du trésor du Québec (2025) 26
Figure 2. 1 Un exemple de problème de PTV à n = 13 nœuds résolu avec m = 4 39
Figure 2. 2 Principales variantes du PTV 42
Figure 2. 3 Différence entre la notion classique du MDARP (a) et notre problème (b) 43
Figure 2. 4 Démarche de destruction et reconstruction 51
Figure 2. 5 Cadre conceptuel 85
Figure 2. 6 Processus d'attribution d'un contrat de balayage 86
Figure 3. 1 Les trois cycles de la design science 91
Figure 3. 2 Les systèmes de balayage chez Arseno Balayage 98
Figure 3. 3 Générateur des distances 106
Figure 3. 4 Cadre opératoire 110
Figure 3. 5 Une solution initiale 120
Figure 3. 6 Suppression orientée selon le type avec échange des arcs 120
Figure 3. 7 Suppression aléatoire des arcs – Insertion aléatoire 121
Figure 3. 8 Suppression du meilleur arc – Insertion au plus proche 122
Figure 3. 9 Suppression aléatoire des arcs – Insertion au plus proche 123
Figure 3. 10 Suppression aléatoire d'un dépôt – Changement aléatoire de dépôt 123

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ALNS : Adaptive Large Neighborhood Search

CVRP : Capacitated Vehicle Routing Problem

DRPP : Directed Rural Postman Problem

GES : Gaz à Effet de Serre

MDARPFED : Multiple Depot Arc Routing Problem with Flexible End Depot

MDOVRP : Multiple Depot Open Vehicle Routing Problem

MDVRP : Multiple Depot Vehicle Routing Problem

MDGVRP : Multiple Depot Green Vehicle Routing Problem

MDVRPPD : Multiple Depot Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery

MPV : Marché Public Vert

MTQ : Ministère des Transports du Québec

VRPPDP : Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery

RAGV : Recherche Adaptative à Grand Voisinage

RPP : The Rural Postman Problem

TS : Tabu Search

TSP : Travelling Salesman Problem

VND : Variable Neighborhood Search

VRP : Vehicle Routing Problem

VRPB : Vehicle Routing Problem Backhauls

VRPPD : Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery

VRPTW : Vehicle Routing Problem with Time Windows

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail de thèse, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à sa réalisation.

Tout d'abord, j'adresse mes sincères remerciements à mon directeur de thèse, Professeur Jean-François Audy, pour son encadrement rigoureux, sa disponibilité, ses conseils éclairés et ses orientations tout au long de ce parcours doctoral. Ses remarques ont grandement contribué à l'avancement et à l'enrichissement de ce travail. Je lui suis également reconnaissante pour les différentes opportunités qu'il m'a offertes, lesquelles ont permis de développer mes compétences et d'élargir mes connaissances.

J'adresse également mes remerciements à ma co-directrice de thèse, Professeure Amina Lamghari, pour son accompagnement, ses conseils et sa disponibilité tout au long de ce travail. Son soutien et ses remarques ont également été précieux et ont contribué à l'avancement de cette recherche.

Je remercie également les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail, ainsi que pour leurs remarques constructives et leur intérêt pour cette recherche. Notamment, Professeure Yasmina Maïzi (Université du Québec à Montréal) et les Professeurs Pascal Forget (Université du Québec à Trois-Rivières) et Luis Antonio de Santa-Eulalia (Université de Sherbrooke).

J'exprime également ma reconnaissance envers l'Université du Québec à Trois-Rivières pour le soutien offert tout au long de ma formation.

Un remerciement particulier à l'entreprise de résidence Arseno Balayage pour la subvention accordée et son soutien tout au long de ce projet de recherche. Cette contribution a été essentielle à la réalisation des travaux présentés dans cette thèse.

Je remercie également l'organisme canadien Mitacs et Innovation et Développement économique Trois-Rivières pour la subvention obtenue, qui a permis de soutenir le développement et l'avancement de cette recherche.

Mes remerciements les plus profonds vont à mes parents et à mes sœurs, pour leur amour inconditionnel et leur soutien tout au long de ces années. Leurs encouragements ont été une source essentielle de motivation et de persévérance.

Je souhaite aussi remercier mes amis et mes collègues pour les échanges enrichissants, l'entraide et les encouragements qui ont rendu ce parcours plus stimulant.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui, par leurs contributions directes ou indirectes, ont permis l'aboutissement de ce travail de thèse.

INTRODUCTION

L'épandage des matériaux abrasifs de source minérale (sable, gravier et pierres concassées) en viabilité hivernale sur les réseaux routiers est une nécessité au niveau des pays connaissant des hivers rigoureux (Blouin et al., 2020; Mokhbi et al., 2017). Cette opération aide à augmenter l'adhésion entre les véhicules et la chaussée verglacée ou enneigée pendant les périodes de grand froid. Au Québec, la quantité d'abrasifs épandue chaque année par les administrations routières publiques sur le réseau des diverses voies de circulation publiques est estimée à 1,8 million de tonnes. À ce tonnage s'ajoutent ceux de l'entretien hivernal des voies routières et piétonnières sous administration privée tels que les stationnements de centres commerciaux et les entrées résidentielles.

D'avril à juillet, une proportion de ces abrasifs est collectée par des véhicules de balayage et transportée vers des sites d'entreposage temporaires puis d'enfouissement afin d'assurer la sécurité des usagers de la route et aussi pour réduire les risques environnementaux et sanitaires (Ragazzi et al., 2023; Rubio-Calderón et al., 2025). Le balayage printanier est une activité saisonnière caractérisée par une forte compétitivité dans le secteur des services. Pour réaliser ces opérations de balayage du réseau routier public, les administrations responsables du réseau local (municipalités) et national (Ministère des Transports du Québec) lancent des appels d'offres. L'appel d'offres public est une procédure formelle d'appel à la concurrence entre les entreprises répondants aux critères de sélection. Le mode d'adjudication d'un contrat de balayage par les autorités publiques est fondé sur le plus bas prix présenté par le prestataire de service. En cas d'attribution du contrat, les entreprises soumissionnaires s'engagent à exécuter les opérations de balayage dans les délais impartis en se conformant aux clauses et conditions des cahiers des charges qui diffèrent selon le commanditaire de l'appel d'offres (Gouvernement du Québec, 2020). De plus, l'entreprise est libre de choisir la façon avec laquelle elle exécutera les opérations de balayage en autant qu'elle remplisse toutes les exigences stipulées dans l'appel d'offres.

Avant de soumettre son offre de service, l'entreprise doit passer par une étape de planification des opérations de balayage pour pouvoir estimer la durée totale des opérations et les coûts opérationnels en fonction de ses ressources disponibles (équipements de balayage et budget) et savoir par la suite si elle sera capable de terminer les opérations de balayage dans les délais impartis et réaliser le bénéfice voulu. Dans la plupart des entreprises de balayage, cette planification est établie manuellement sans aucun recours aux outils d'aide à la décision (Strand et al., 2020). Dans le cadre de cette recherche, une résidence réalisée au sein de l'entreprise québécoise Arseno Balayage, spécialisée dans les opérations de balayage printanier, a permis de confirmer ce constat. Les opérations y sont planifiées manuellement, en s'appuyant principalement sur le savoir-faire et l'expérience du gestionnaire. La planification manuelle demande beaucoup de temps à cause de la complexité du réseau routier, du nombre important des routes à balayer et des exigences à respecter en même temps. Cette façon de procéder n'assure pas l'obtention de plans efficients et engendre souvent des estimations erronées des délais et des coûts opérationnels. Par conséquent, en cas d'attribution du contrat, il peut y avoir d'une part, un retard au niveau du temps de fin de service des opérations qui va engendrer des pénalités de retard et d'autre part, une augmentation des coûts opérationnels qui aura un impact négatif sur le bénéfice.

Dans ce contexte de forte concurrence, le prestataire de services doit maintenir un niveau élevé de qualité de service tout en minimisant les coûts opérationnels. Or, la brosse de balayage, identifié comme principal élément goulot d'un système de balayage, constitue un levier déterminant de la performance. L'augmentation de la vitesse de balayage apparaît toutefois limitée par plusieurs contraintes techniques, notamment la détérioration de la qualité du service rendu et la dégradation accélérée des brosses.

L'entreprise de résidence opère deux systèmes de balayage, un système novateur qu'elle possède suite à une R&D interne et un système classique similaire à celui existant chez la compétition. Le système novateur est caractérisé par une

productivité plus élevée et consomme moins de carburant par tonne collectée, entraînant ainsi une diminution des émissions de GES. Ces dernières sont estimées à partir de la consommation de carburant au moyen d'un facteur d'émission spécifique au diesel.

La balayeuse du système novateur est équipée d'un convoyeur qui assure un déchargement frontal continu des balayures dans un camion benne à l'inverse du système classique composé d'une balayeuse classique qui doit arrêter le service et se déplacer pour le déchargement. En revanche, le système novateur repose encore sur des brosses conventionnelles similaires à celles utilisées par le système classique, ce qui restreint leur capacité à exploiter pleinement leur potentiel opérationnel.

Ainsi, l'amélioration de l'efficience opérationnelle ne peut se réduire à un simple ajustement de la vitesse de balayage. Elle requiert un véritable effort de recherche et développement (R&D) visant à concevoir des brosses adaptées aux nouvelles contraintes mécaniques et opérationnelles.

La littérature existante s'est principalement intéressée aux performances techniques des brosses, telles que leur durée de vie (Bartolozzi et al., 2018), leur efficacité mécanique (Milijaš et al., 2023; Vanegas-Useche et al., 2015), la qualité du balayage (Fayzullayevich et al., 2022; Guedes et al., 2025; Jeong et al., 2025) ou encore leur rendement énergétique (Donati et al., 2020; Pan et al., 2023; Wang et al., 2025). En revanche, les implications opérationnelles et économiques de l'innovation dans le balayage printanier demeurent non explorées. Ceci limite la capacité du prestataire à appuyer ses décisions d'investissement en R&D sur des analyses quantitatives intégrant simultanément les dimensions techniques, opérationnelles et économiques. Dès lors, l'évaluation des gains potentiels en durée et en coûts associés à l'amélioration des brosses apparaît essentielle pour éclairer les décisions d'investissement et les retours attendus ainsi qu'à définir des spécifications techniques compatibles avec des exigences accrues de performance.

Parallèlement à ces enjeux technico-économiques, le secteur du balayage fait face à une évolution progressive du cadre institutionnel des marchés publics, marquée par une pression croissante en faveur de l'intégration de critères environnementaux. Actuellement, au niveau des appels d'offres de balayage au Québec, le seul critère d'attribution d'un contrat à un prestataire de services dont la soumission est conforme aux exigences est le plus bas prix soumissionné. Les autorités publiques québécoises chargées de l'octroi d'un contrat de balayage n'imposent pas, au niveau des critères d'adjudication des appels d'offres, des normes environnementales en matière, par exemple, de niveau d'émissions de GES qui devraient être respectées.

Dans ce contexte d'achat de services saisonniers, le système de balayage novateur à faibles émissions de GES n'est pas encore rémunéré à la hauteur de ses bénéfices environnementaux. Une éventuelle transition vers des marchés publics intégrant des considérations environnementales soulèverait de nouveaux enjeux décisionnels pour les autorités publiques, notamment en ce qui concerne l'évaluation des soumissions éco-innovantes et classiques. Or, la reconnaissance financière des bénéfices environnementaux demeure complexe. Les marchés publics verts (MPV) constituent une réponse à cette problématique. Leur logique repose sur l'intégration simultanée de critères monétaires et environnementaux dans l'évaluation des soumissions. Toutefois, la manière dont ces modèles sont construits et paramétrés influence directement les décisions d'adjudication et le surcoût pour l'octroi d'un contrat à un fournisseur éco-innovant par rapport aux fournisseurs-compétiteurs. Dans cette perspective, il devient pertinent d'examiner comment modéliser et paramétriser les MPV pour explorer les dynamiques décisionnelles propres à chaque modèle. Une telle analyse permet d'éclairer les implications financières du choix d'un modèle plutôt qu'un autre, tout en reconnaissant le caractère contextuel des résultats obtenus.

Bien que les marchés publics verts soient reconnus comme des leviers potentiels de stimulation de l'éco-innovation et de renforcement de la compétitivité (Yang et Morotomi, 2025), la littérature demeure encore limitée. Les travaux existants proposent

principalement des directives générales, telles que l'adoption de normes et de spécifications techniques (Rainville, 2022), de critères de performance environnementale (Han et al., 2024; Orfanidou et al., 2023) ou de mécanismes incitatifs (Caruana et Vassallo, 2024; Chiappinelli et Seres, 2024; Lichère, 2025), sans toutefois expliciter leur traduction en modèles concrets et opérationnels dans les appels d'offres (Krieger et Zipperer, 2022 ; Yang et Morotomi, 2025). Il découle que l'intégration d'un critère d'émissions de GES au niveau des appels d'offres dans un marché public vert peut agir comme un puissant stimulant pour l'éco-innovation (Braulio-Gonzalo et Bovea, 2020 ; Kundu et al., 2020 ; Yu et Morotomi, 2022). Plusieurs études ont montré que remporter des contrats de marché public vert incite les entreprises, en particulier les petites, à développer des produits et des processus plus respectueux de l'environnement. Toutefois, l'exploration et l'analyse approfondie de l'innovation dans le cadre des marchés publics verts sont encore relativement limitées. Les recherches sur ce sujet spécifique demeurent limitées, ce qui révèle un écart important dans les connaissances concernant le soutien et la reconnaissance des éco-innovations dans le contexte des marchés publics verts. Il est donc essentiel de mener davantage d'études approfondies afin de mieux comprendre les conditions d'adoption et de valorisation de ces innovations, et ainsi enrichir la littérature sur l'intégration de l'éco-innovation dans les politiques des marchés publics verts.

Malgré l'importance des opérations de balayage, la littérature manque d'études sur les problèmes de planification au niveau de ce secteur (Strand et al., 2020) et sur les effets opérationnels et économiques d'une innovation technologique comme des brosses plus performantes. Elle demeure également limitée quant à la traduction concrète des critères environnementaux dans les marchés publics, alors que le rôle de ces derniers dans le soutien et la reconnaissance de l'éco-innovation reste encore peu documenté et insuffisamment démontré.

Ces lacunes freinent à la fois l'amélioration de la planification, l'efficience opérationnelle, les décisions d'investissement en R&D et la capacité des autorités

publiques à intégrer la performance environnementale dans les critères d'adjudication d'un appel d'offres. Ainsi, nous proposons de combler ces lacunes. Spécifiquement, les objectifs de notre recherche consistent à :

- Développer un modèle mathématique sous forme d'un programme linéaire qui minimise le temps de balayage et le nombre de quarts de travail, tout en respectant l'ensemble des contraintes des appels d'offres;
- Développer une méthode de résolution (heuristique et métaheuristique) pour générer les plans de balayage dans un temps raisonnable;
- Développer un générateur d'instances de différentes dispersions géographiques des tronçons à balayer pour déterminer l'écart en termes de coûts opérationnels et émissions de GES entre deux systèmes de balayage;
- Déterminer les retombées opérationnelles et économiques de l'innovation dans les brosses de balayage, en quantifiant l'impact de l'augmentation de la vitesse de balayage sur les durées et les coûts d'opération;
- Adapter et appliquer des modèles existants de consommation de carburant et d'émissions de GES pour évaluer la performance environnementale de chaque système de balayage;
- Déterminer les modèles de coûts opérationnels pour chaque système de balayage;
- Proposer un cadre analytique pour l'intégration des critères environnementaux dans le processus d'adjudication d'un appel d'offres dans un marché public vert;
- Déterminer, pour chaque modèle de MPV proposé, le surcoût minimal associé à l'octroi à une soumission avec une performance environnementale supérieure en contexte de balayage.

Nous résumons les contributions de notre recherche sous trois volets. Premièrement, au niveau managérial, nous offrirons des outils d'aide à la décision

destinés au prestataire de services. Les résultats offrent des repères quantifiés permettant d'évaluer la pertinence d'investissements en R&D, notamment en matière de conception de brosses plus performantes. La thèse propose également un cadre analytique pour l'intégration de critères environnementaux au niveau des appels d'offres en marchés publics, rendant possible l'évaluation transparente de la performance environnementale des soumissions ainsi que le test de différents niveaux d'exigence environnementale et d'en évaluer les conséquences budgétaires et environnementales. Des modèles de consommation de carburant, d'émissions de GES et de coûts sont appliqués afin de générer des indicateurs quantitatifs de performance. Par la suite, différents modèles de marchés publics verts sont proposés, intégrant des critères environnementaux, notamment les émissions de GES, en complément des critères économiques. Ces modèles de MPV s'appuient sur les indicateurs issus des modèles opérationnels afin de permettre une comparaison structurée des soumissions dans le cadre des appels d'offres.

Ce cadre permet en outre d'évaluer le surcoût minimal associé à l'octroi à une soumission avec une performance environnementale supérieure, contribuant ainsi à un meilleur compromis entre objectifs économiques, opérationnels et environnementaux.

Deuxièmement, au niveau méthodologique, nous contribuerons par le développement d'un modèle mathématique de planification des opérations de balayage, formulé sous la forme d'un programme linéaire avec l'objectif de minimisation de la durée totale des opérations et du nombre de quarts de travail. À ce modèle s'ajoute le développement d'une méthode de résolution combinant heuristiques et métaheuristiques, permettant de générer des plans de balayage dans des délais de calcul compatibles avec des contextes opérationnels réels. La recherche introduit également un générateur d'instances reproduisant différentes configurations de dispersion géographique des tronçons à balayer, offrant un outil méthodologique pour tester la robustesse et la transférabilité des solutions proposées.

Troisièmement, sur le plan analytique et empirique, la thèse contribue à une meilleure compréhension des liens entre innovation technologique, planification des opérations et performance économique dans le secteur du balayage. Elle quantifie les retombées opérationnelles et économiques associées à l'innovation dans les brosses de balayage, en évaluant l'effet de l'augmentation de la vitesse de balayage sur les durées et les coûts opérationnels. Elle applique et analyse également des modèles de consommation de carburant et d'émissions de GES propres à chaque système de balayage, ainsi que des modèles de coûts opérationnels permettant une comparaison rigoureuse entre le système classique et le système novateur dans différents scénarios de marchés publics verts. Elle propose en outre une formalisation de modèles de MPV adaptés au service de balayage, intégrant un historique d'achats récurrents, lesquels sont ensuite testés et paramétrés selon la littérature.

Le reste de la thèse est structuré comme suit : le chapitre 1 présente la problématique managériale, le chapitre 2 passe en revue la littérature importante et le cadre conceptuel, le chapitre 3 expose le cadre opérationnel, le chapitre 4 présente les articles de la thèse et le dernier chapitre 5 porte sur la discussion générale des résultats, les limites et les pistes de recherches futures.

PREMIER CHAPITRE
PROBLÉMATIQUE MANAGÉRIALE

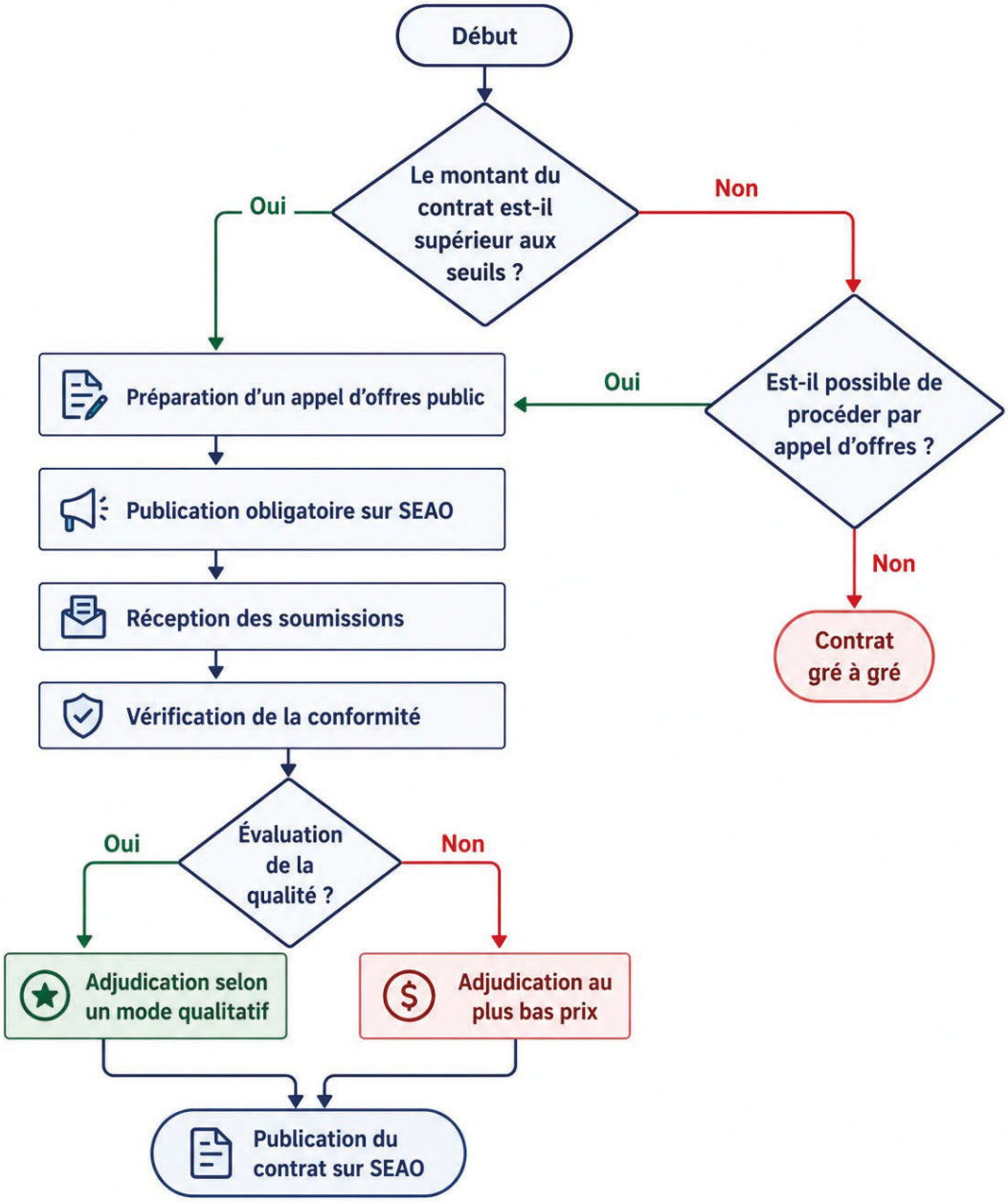
Ce chapitre est consacré à la présentation de la problématique managériale identifiée lors du stage de résidence effectué dans l'entreprise Arseno Balayage. Dans un premier temps, nous présenterons les différentes exigences administratives et techniques qui doivent être respectées par les prestataires de service et le processus actuel d'attribution d'un contrat. Par la suite, il sera question des enjeux auxquels l'entreprise fait face au niveau de la préparation de plans de balayage plus efficients, l'amélioration de ses performances opérationnelles et économiques et la prise de décisions d'investissement avisées et la transition vers les marchés publics verts. Finalement, nous conclurons ce chapitre en présentant la problématique managériale.

1.1 PROCESSUS ACTUEL D'ATTRIBUTION D'UN CONTRAT ET EXIGENCES ADMINISTRATIVES ET TECHNIQUES

1.1.1 Le processus actuel d'attribution d'un contrat

Les organismes publics du Gouvernement du Québec adjugent des contrats de service aux entreprises privés selon deux modes d'octroi, le contrat de gré à gré et le contrat attribué suite à un appel d'offres public. Pour déterminer le mode d'octroi, l'organisme public doit tenir compte du montant total du contrat. Les contrats de gré en gré sont attribués lorsque le montant du contrat est inférieur aux seuils prédéfinis par les accords de libéralisation. Toutefois, l'adjudicateur doit étudier la possibilité de procéder par un appel d'offres public avant de conclure un contrat de gré à gré. Nous présentons dans la Figure 1.1 le processus d'octroi d'un contrat selon le Secrétariat du Conseil du trésor du Québec.

Figure 1. 1
Processus d'octroi d'un contrat selon le Secrétariat du Conseil du trésor du Québec (2025)



Source : Secrétariat du Conseil du trésor du Québec (2025)

La première étape consiste à vérifier si le montant du contrat est supérieur aux seuils définis dans les accords de libéralisation. Si le montant est au-dessous des seuils, l'organisme conclut un contrat gré à gré sinon, l'organisme procède par un appel d'offres public. Les organismes publics sont tenus de publier les avis d'appel d'offres public dans le système électronique d'appel d'offres (SEAO) en indiquant, selon le type du contrat, le mode d'adjudication approprié. Après la réception des soumissions, l'organisme procède à la vérification de la conformité des soumissions aux exigences mentionnées au niveau du document de l'appel d'offres. Puis, si le mode d'adjudication se base sur la qualité de la soumission, l'organisme étudie le niveau du respect de cette condition et adjuge le contrat au prestataire conforme. Sinon, le contrat est attribué selon le prix le plus bas. A la fin, l'organisme publie le résultat sur le SEAO.

Au niveau du service de balayage printanier, le contrat est adjugé au prestataire de services qui remplit toutes les exigences selon le mode d'adjudication du prix le plus bas suite à un appel d'offres public.

1.1.2 Les exigences administratives et techniques

Le service de balayage printanier est encadré par plusieurs exigences administratives et techniques présentées au niveau du cahier des charges et devis généraux des infrastructures routières au Québec et des normes du ministère des Transports, Tomes I à VIII (Leclerc, 2020).

Nous présentons dans le Tableau 1.1 des exemples d'exigences de nature administratives et techniques qui doivent être respectées par le prestataire de service.

Tableau 1. 1
Exemples d'exigences administratives et techniques du service de balayage

Type d'exigence	**Exemple**
Administrative	-Informer le MTQ par écrit, au moins 10 jours d'avance, de la date envisagée pour commencer les opérations de balayage. Ces opérations ne peuvent commencer qu'après la réception d'une autorisation écrite et signée par le MTQ. -Fournir au surveillant des opérations un plan détaillé des opérations et toutes les informations nécessaires sur la main-d'œuvre, les équipements requis et leurs fiches techniques. -Remplir les obligations qui lui sont accordées conformément à la Loi sur la santé et la sécurité du travail (RLRQ, chapitre S-2.1). -Fournir un registre journalier des opérations exécutées au surveillant.
Technique	-Disposer d'une arroseuse d'au moins 9000 L, d'une balayeuse automotrice munie de deux brosses de caniveau et d'une brosse ramasseuse d'au moins 2 m, ainsi que de camions bennes pour les débris. -Équiper la flotte d'un gyrophare, d'une flèche de signalisation, de panneaux de vitesse et d'un AIFV pour les routes à deux voies et plus (≥ 70 km/h). -S'engager à corriger immédiatement, à ses frais, tout travail non conforme dès réception d'un avis du surveillant indiquant les défauts ou omissions. -Éliminer les dangers, assurer la sécurité des usagers et protéger les biens publics lors des opérations de balayage. En cas de dommages, le prestataire doit en informer le MTQ et effectuer les réparations à ses frais.

	-Terminer les opérations dans un délai de 21 jours suivant l'autorisation. En cas de retard, une pénalité de 1000 $ par jour s'applique, portée à 2500 $ par jour si les travaux dépassent le vendredi précédant la Journée nationale des patriotes. -Entreposer le matériel de façon sécuritaire pour les usagers de la route dans les dépôts (garages). -Déposer les débris dans des sites temporaires approuvés par le MTQ, puis les acheminer vers des lieux d'enfouissement technique. -Éviter l'exécution des opérations de balayage les fins de semaine et pendant les jours fériés (p.ex. Journée nationale des patriotes). Pour les autoroutes, le balayage doit s'effectuer uniquement pendant la nuit.

Source : Leclerc (2020)

Le prestataire de services s'engage à faire les opérations de balayage pour un prix forfaitaire. Ce prix doit donc couvrir toutes les dépenses, les frais directs ou indirects, les omissions, les erreurs et toutes les responsabilités liées à la réalisation des opérations de balayage. Ce prix inclut également tous les frais généraux de l'entreprise : loyer, électricité, assurances, comptabilité, terrains de dépôts, analyse des abrasifs et autres dépenses incidentes. En outre, le prestataire de services doit tenir compte dans l'estimation du prix global, de la fluctuation des salaires et des prix, des grèves, des retards, des accidents, des incertitudes de l'environnement externe, etc. En plus, le prix du contrat ne doit pas inclure la taxe sur les produits et services (TPS) et la taxe de vente du Québec (TVQ). Ces taxes seront ajoutées à la facturation.

1.2 ENJEUX DE LA PLANIFICATION DES OPÉRATIONS DE BALAYAGE PRINTANIER

Lors de la préparation d'une soumission, le prestataire de services doit établir un plan de balayage lui permettant d'estimer la durée des opérations, les ressources nécessaires et les coûts associés afin d'évaluer sa capacité à respecter les exigences des appels d'offres. L'objectif est de compléter le balayage de la région associée au contrat le plus rapidement possible afin de libérer les ressources nécessaires à la réalisation d'autres contrats. Les décisions prises à cette étape influencent directement la compétitivité de la soumission ainsi que la capacité du prestataire à respecter les délais contractuels (Divakar, 2019). Une planification inefficiente peut entraîner des retards d'exécution, des pénalités contractuelles, une augmentation des coûts opérationnels et une diminution du bénéfice attendu.

En outre, la littérature demeure limitée en ce qui concerne la résolution des problèmes de planification au niveau du secteur du balayage (Strand et al., 2020). Le problème de planification fait partie du problème de tournées de véhicules (PTV) introduit par Dantzig et Ramser (1959) qui est considéré comme l'un des problèmes d'optimisation combinatoire les plus étudiés. Ce problème consiste à planifier un ensemble d'itinéraires soumis à des contraintes à respecter selon un objectif donné (Toth et Vigo, 2001). Dans notre contexte, l'objectif est de minimiser la durée totale et le nombre de quarts de travail, tout en respectant l'ensemble des contraintes mentionnées au niveau des appels d'offres.

Ainsi, le développement d'un outil de planification avancée apparaît pertinent afin d'aider le prestataire de services à préparer des soumissions plus compétitives, tout en générant des plans de balayage plus efficients.

1.3 INNOVATION DANS LES BROSSES DE BALAYAGE : DÉCISIONS D'INVESTISSEMENT ET EFFICIENCE OPERATIONNELLE

L'amélioration des performances des équipements de balayage constitue un levier important pour accroître l'efficience opérationnelle. À cet égard, la brosse est considérée comme l'élément goulot du système de balayage, puisqu'elle détermine la vitesse de balayage et, par conséquent, la durée des opérations et les coûts associés. Toutefois, l'augmentation de la vitesse de balayage ne peut être envisagée sans tenir compte des contraintes liées à la qualité du nettoyage et à la dégradation prématurée des brosses. Le système novateur développé par Arseno repose actuellement sur des brosses conventionnelles qui ne sont pas conçues pour maintenir une qualité de nettoyage à des vitesses plus élevées. L'amélioration de la performance opérationnelle nécessite donc un effort de R&D visant à concevoir des brosses adaptées aux contraintes mécaniques et opérationnelles du système novateur. Il devient donc nécessaire de s'appuyer sur des analyses quantitatives capables de mesurer comment une augmentation de la vitesse de balayage influence les coûts et les durées d'opération. De plus, la projection de ces gains contribuera à éclairer de futures évaluations de retour sur investissement et à soutenir des décisions d'investissement plus avisées. Ces résultats offriront également des repères essentiels pour définir les spécifications techniques que devront atteindre les futures brosses afin de maintenir la qualité du nettoyage à des vitesses plus élevées.

La littérature s'est généralement concentrée sur la performance technique des brosses comme la durée de vie (Bartolozzi et al., 2018), efficacité mécanique (Milijaš et al., 2023; Vanegas-Useche et al., 2015), qualité du balayage (Fayzullayevich et al., 2022; Jeong et al., 2025) ou encore rendement énergétique (Donati et al., 2020; Pan et al., 2023; Wang et al., 2025). Les conséquences opérationnelles et économiques de l'innovation dans le balayage printanier ont souvent été négligées, laissant un écart important dans la compréhension globale de l'efficience opérationnelle. L'analyse des retombées économiques et opérationnelles fournit une vision intégrée capable de

guider les décisions d'investissement en R&D tout en les articulant avec les enjeux techniques.

1.4 ENJEUX DES MARCHÉS PUBLICS VERTS

Actuellement, au niveau du marché public de balayage, un contrat est attribué selon la soumission économiquement la plus avantageuse qui satisfait au mieux aux critères de prix et qualité exigés par l'autorité publique. Les appels d'offres actuels n'incluent pas des critères environnementaux de sélection comme les émissions de GES. Toutefois, la pression actuelle exercée par le gouvernement au niveau des marchés publics pour adopter des pratiques vertes présente un enjeu pour les prestataires du service de balayage au Canada (Ma et al., 2020). Bien que ces orientations gouvernementales favorisent une transition vers des achats publics plus durables, elles ne sont pas encore pleinement reflétées dans les pratiques d'adjudication des autorités publiques responsables des appels d'offres de balayage. Par conséquent, les performances environnementales du système novateur, notamment ses faibles émissions de GES, ne sont actuellement pas valorisées dans les processus d'évaluation des soumissions. Également, la littérature sur les marchés publics verts demeure limitée en ce qui concerne la modélisation analytique des marchés publics verts et la formalisation des critères d'adjudication des appels d'offres. Cette lacune pose un enjeu direct pour l'autorité publique, qui se retrouve à devoir intégrer des objectifs environnementaux dans ses décisions sans disposer de cadres analytiques pour guider la comparaison des soumissions. L'absence de formalisation claire des MPV peut influencer de manière significative le résultat de l'adjudication, ainsi que le surcoût minimum pour l'octroi d'un contrat à un fournisseur éco-innovant par rapport aux fournisseurs-compétiteurs.

Bien que les MPV pourraient stimuler l'éco-innovation et renforcer la compétitivité des prestataires, la littérature demeure encore limitée à ce sujet (Yang et Morotomi, 2025). Les études ont souvent proposé aux autorités publiques d'adopter

des directives générales telles que les normes, les spécifications techniques (Rainville, 2022), les critères de performance (Han et al., 2024; Orfanidou et al., 2023) ou encore les mesures incitatives (Caruana et Vassallo, 2024; Chiappinelli et Seres, 2024; Lichère, 2025), sans toutefois expliquer comment ces éléments peuvent être traduits en critères d'adjudication concrets, utilisables dans un appel d'offres (Krieger et Zipperer, 2022; Yang et Morotomi, 2025). Par exemple, au niveau des marchés publics de balayage en Europe, la commission européenne a imposé aux prestataires de service de posséder des véhicules équipés de certaines technologies spécifiques (systèmes d'accumulation d'énergie, correcteurs automatiques de freinage, etc.), l'utilisation d'un carburant renouvelable, le respect des niveaux d'émissions tolérés de polluants atmosphériques, etc. (Commission Européenne, 2021). L'élaboration de modèles de MPV visant à intégrer des critères environnementaux demeure limitée. Des freins structurels, tels que la prédominance du critère du plus bas prix (Sapir et al., 2022; Treviño-Lozano et al., 2021) et le manque d'incitations (Lichère, 2025; Lindfors et Ammenberg, 2021; Zheng et Wen, 2024) réduisent leur efficacité à stimuler l'éco-innovation. En conséquence, un écart subsiste dans la littérature quant à la modélisation analytique des MPV et leur impact sur l'éco-innovation.

Ainsi, le défi consiste à modéliser des MPV pour le cas de balayage permettant de déterminer de manière transparente le surcoût minimum pour l'octroi d'un contrat à un fournisseur éco-innovant. Dans ce cadre, l'outil de planification avancée des opérations de balayage sera utilisé pour générer, pour chaque système, des plans de balayage permettant d'estimer leurs émissions de GES respectives. Ces estimations serviront ensuite d'intrants aux modèles de MPV afin d'évaluer la performance globale du système novateur par rapport au système classique. Bien que l'application empirique de cette recherche porte sur les émissions de GES, les modèles de MPV proposés sont généralisables pour intégrer plus d'un critère environnemental dans le processus d'évaluation.

1.5 OBJECTIFS ET QUESTIONS DE RECHERCHE

Lors de la résidence à l'entreprise Arseno Balayage, plusieurs enjeux liés au processus actuel de préparation de la soumission ont été identifiés et présentés dans le Tableau 1.2. Ces enjeux concernent principalement l'inefficience du processus de création des plans de balayage qui sont établis manuellement, le manque d'outils d'analyses quantitatives permettant de soutenir des décisions d'investissement avisées en R&D pour des brosses plus performantes, ainsi que l'absence d'un cadre analytique qui propose des modèles de MPV capables d'estimer le surcoût minimum pour l'octroi d'un contrat à un fournisseur éco-innovant par rapport aux fournisseurs-compétiteurs.

Cette étude traite ces enjeux opérationnels et environnementaux en développant, premièrement, un outil de planification avancée, qui minimise la durée totale des opérations, permettant d'améliorer les plans de balayage donc améliorer la compétitivité du prestataire à remporter plus de contrats. Deuxièmement, cet outil de planification est utilisé pour étudier l'impact de l'augmentation de la vitesse de balayage sur l'efficience opérationnelle (durée opérationnelle, nombre de quarts, coût total, etc.). Par la suite, les gains projetés sont déduits afin de supporter la décision d'investissement. Finalement, des modèles d'émissions de GES ont été formulés et intégrés au niveau de l'outil de planification afin de générer des plans pour chacun des deux systèmes qui minimisent les émissions de GES. Par la suite, des modèles de MPV sont proposés qui intègrent les données sur les émissions afin de déterminer le surcoût pour l'octroi d'un contrat au système novateur.

L'objectif consiste donc à aider les prestataires de services de balayage à relever les défis que posent ces enjeux afin d'améliorer leur processus de préparation des soumissions dans le marché actuel concurrentiel et dans un futur marché public vert. Également, la formalisation des MPV vise à fournir aux autorités un cadre analytique structuré leur permettant de mieux comprendre les implications du choix d'un modèle et de sa paramétrisation.

Tableau 1. 2
Synthèse des enjeux et solutions

Dimension	Enjeux identifié	Conséquence	Solutions envisagée
Opérationnelle	Des plans de balayage inefficaces établis manuellement	-Retard au niveau du temps de fin de service -Pénalités dues aux retards -Mauvaise affectation des ressources -Perte de productivité	Outil de planification avancée pour améliorer les plans et l'efficience opérationnelle
Technique/ technologique	Vitesse de balayage limitée par les brosses existantes	-Dégradation de la qualité de nettoyage -Usure prématurée des brosses -Couverture non performante des zones à balayer	R&D pour l'innovation dans des brosses adaptées au système novateur
Économique	Absence d'outils d'évaluation des gains potentiels d'une future innovation	-Difficulté à prendre des décisions d'investissement	Analyses quantitatives des gains pour soutenir les décisions d'investissement
Environnementale	La performance environnementale du système novateur est non récompensée dans les appels d'offres actuels	-Non-reconnaissance de l'éco-innovation -Impossibilité de justifier un prix plus élevé	Estimation des émissions via les plans de balayage et intégration de la performance environnementale dans un cadre de MPV
Réglementaire	Absence de critères environnementaux et incitations limitées par les autorités publiques au niveau des appels d'offres	-Difficulté à estimer le surcoût	Développement d'un cadre analytique de MPV pour évaluer et estimer le surcoût de l'éco-innovation de manière transparente

Source : Construction personnelle

Malgré l'importance des opérations de balayage et les problèmes pratiques qui existent au niveau de ce secteur, les contributions scientifiques sont relativement limitées (Vanegas-Useche et al., 2015). La littérature manque d'études sur la planification et l'optimisation des opérations de balayage à l'exception des travaux de Cerrone et al. (2014), Liu et al. (2024), Parsons et al. (2024, 2025) et Yurtseven et Gökçe (2019). Également, les recherches précédentes se sont principalement focalisées sur la performance technique (Polukarova et al., 2020; Yang et al., 2018), au détriment des implications opérationnelles et économiques liées à l'innovation en brosses plus performantes. Par ailleurs, les preuves empiriques concernant l'impact réel des marchés publics verts sur l'éco-innovation des prestataires et sur leur compétitivité demeurent limitées (Krieger et Zipperer, 2022; Yang et Morotomi, 2025). Cette faiblesse empirique s'explique en partie par l'absence de cadres analytiques clairement formalisés permettant d'intégrer de manière structurée les critères environnementaux dans le processus d'évaluation des soumissions (Lichère, 2025). Donc, il devient difficile de comprendre comment les MPV affectent les incitations à l'éco-innovation. Toutes ces lacunes soulignent la nécessité d'entreprendre des études qui permettraient d'aider les prestataires de service en balayage et les autorités publiques dans leurs processus de prise de décision. À la lumière des éléments précédemment présentés, ce travail de thèse vise à répondre aux trois questions de recherche suivantes:

1- Comment optimiser la planification des opérations de balayage printanier ?

2- Comment les gains d'efficience opérationnelle liés à une augmentation de la vitesse de balayage peuvent-ils orienter les décisions d'investissement en R&D en brosses adaptées au système novateur ?

3- Comment concevoir un cadre analytique de MPV permettant d'estimer le surcoût minimum pour l'octroi d'un contrat à un fournisseur éco-innovant par rapport aux fournisseurs-compétiteurs ?

Le Tableau 1.3 présente une synthèse des liens entre les objectifs de la recherche, les questions de recherche et les trois articles constituant cette thèse.

Tableau 1. 3
Synthèse des liens entre les objectifs, les questions de recherche et les articles de la thèse

Objectif général	Objectifs spécifiques	Question de recherche	Article
Améliorer la planification des opérations de balayage	-Développer le modèle mathématique. -Développer l'heuristique et la métaheuristique. -Développer le générateur d'instances.	Comment optimiser la planification des opérations de balayage printanier ?	Article 1
Évaluer les retombées d'une innovation technologique	- Implémentation des scénarios de vitesse. -Déterminer les modèles de coûts opérationnels. -Déterminer les retombées opérationnelles et économiques de l'augmentation de la vitesse.	Comment les gains liés à l'augmentation de la vitesse peuvent-ils orienter les décisions d'investissement en R&D ?	Article 2
Développer un cadre analytique de marchés publics verts	- Adapter les modèles de consommation de carburant et d'émissions de GES. - Proposer un cadre analytique de MPV. -Déterminer le surcoût minimal associé à une soumission éco-innovante.	Comment concevoir un cadre analytique de MPV permettant d'estimer le surcoût minimal ?	Article 3

Source : Construction personnelle

DEUXIÈME CHAPITRE
LE CONTEXTE THÉORIQUE

Le deuxième chapitre présente le contexte théorique et la documentation scientifique pertinente à notre recherche. Nous commençons par définir les problèmes de tournées de véhicules, ses principales variantes, les principales similarités et différences de notre problème de planification par rapport aux travaux présentés dans la littérature, les méthodes existantes pour résoudre ces problèmes ainsi que les travaux existants au niveau du secteur de balayage. Par la suite, nous définissons l'innovation et sa variante éco-innovation, les obstacles de son implémentation au niveau des PME et les aspects techniques et opérationnels liés à un projet de technologie en particulier, les brosses de balayage. Puis, nous abordons la littérature sur les marchés publics verts en spécifiant les normes et les réglementations actuelles, l'impact des marchés publics verts sur l'éco-innovation, ainsi que les lacunes des recherches existantes. Finalement, nous concluons ce chapitre en présentant notre cadre conceptuel.

2.1. APERÇU SUR LE PROBLÈME DE TOURNÉES DE VÉHICULES

2.1.1. Définition et formulation du problème de tournées de véhicules

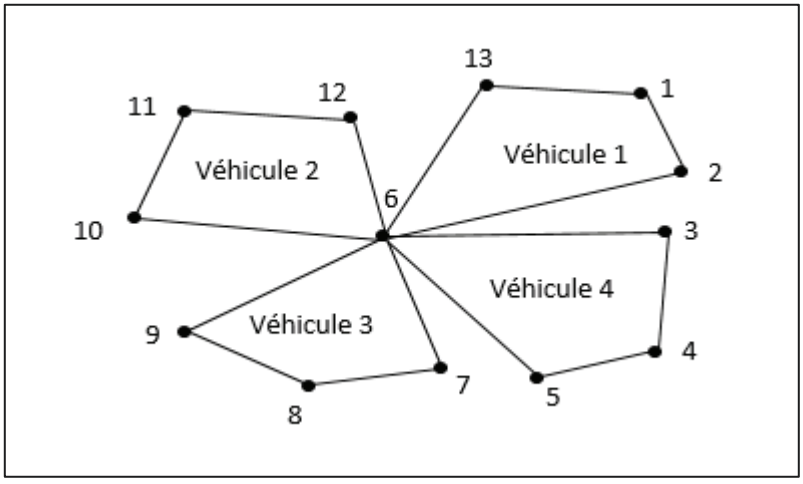
Le problème de tournées de véhicules connu sous l'acronyme PTV ou VRP (Vehicle Routing Problem) fait partie des problèmes d'optimisation combinatoire et de recherche opérationnelle. Dans ce problème relevant du domaine de la logistique, une flotte de véhicules basée dans un ou plusieurs dépôts, doit desservir un ensemble de clients ou les routes d'un réseau de transport avec un objectif de minimisation des coûts opérationnels, de la distance totale parcourue, etc. (Han et Cueto, 2015). La difficulté à résoudre le PTV ainsi que ses nombreuses applications pratiques en logistique sont parmi les principales motivations pour étudier ce problème (Ismail et al., 2011).

Selon la définition classique du PTV, ce problème est défini sur un graphe orienté $G = (V, A)$ tels que $V = \{v_1, \ldots, v_n\}$ est l'ensemble des n nœuds (clients à servir) du graphe et v_0 est le dépôt. $A = \{(i,j) | i,j \in V ; i \neq j\}$ est l'ensemble des arcs composants le graphe. De cet ensemble A, C = (c_{ij}) est la matrice de distances/coûts associée à A. K= $\{1, \ldots, m\}$ présente l'ensemble de véhicules de capacité Q et x_{ijk} est la variable de décision de ce problème tels que :

$$X_{ij}^{k} = \begin{cases} 1 & si\ l'arc(i,j)\ est\ parcouru\ par\ le\ véhicule\ k \\ 0\ sinon & \end{cases}$$

La Figure 2.1 illustre un graphe d'un PTV à $n = 13$ nœuds et $m = 4$ véhicules.

Figure 2. 1
Un exemple de problème de PTV à n = 13 nœuds résolu avec m = 4



Source : Construction personnelle

La formulation mathématique par programmation en nombres entiers du problème classique du PTV est présenté comme suit :

$$Minimiser \sum_{i\in \mathrm{V}} \sum_{j\in \mathrm{V}} \sum_{k\in \mathrm{K}} c_{ij} x_{ijk} \qquad (2.1)$$

Sujet à :

$$\sum_{i\in \mathrm{V}} \sum_{k\in \mathrm{K}} x_{ijk} = 1 \; \forall j \in \mathrm{V} \qquad (2.2)$$

$$\sum_{j\in \mathrm{V}} \sum_{k\in \mathrm{K}} x_{ijk} = 1 \; \forall i \in \mathrm{V} \qquad (2.3)$$

$$\sum_{i\in \mathrm{V}} \sum_{l\in \mathrm{V}} x_{ilk} = \sum_{l\in \mathrm{V}} \sum_{j\in \mathrm{V}} x_{ljk} \qquad (2.4)$$

$$\sum_{j\in \mathrm{V}} x_{0jk} = 1 \; \forall k \in \mathrm{K} \qquad (2.5)$$

$$\sum_{i\in \mathrm{V}} x_{i0k} = 1 \; \forall k \in \mathrm{K} \qquad (2.6)$$

$$\sum_{i\in \mathrm{V}} \sum_{j\in \mathrm{V}} x_{ijk} \leq Q \;\; \forall k \in \mathrm{K} \qquad (2.7)$$

$$0 \leq x_{ijk} \leq 1 \; \forall k \in \mathrm{K} \; \forall i, j \in \mathrm{V} \cup \{0\} \qquad (2.8)$$

Sous cette formulation, (1) signifie que l'objectif du problème d'optimisation est de minimiser la somme des coûts de toutes les routes. Les contraintes (2) et (3) indiquent que chaque client doit être desservi une et une seule fois. Les contraintes (4) assurent la conservation du flux. Les contraintes (5) imposent que chaque route commence et se termine au dépôt. Les contraintes (6) sont les contraintes de capacité et les contraintes (7) imposent la nature et le domaine des variables.

2.1.2. Les principales variantes du problème de tournées de véhicules

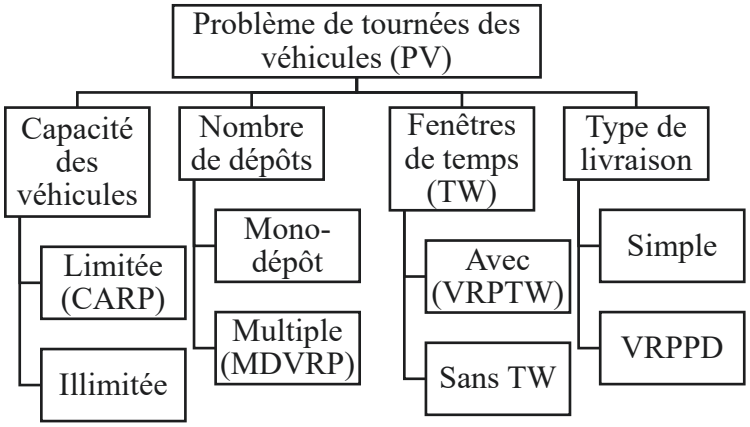
La multitude d'applications du PTV, notamment dans le domaine du transport et de distribution, a fait naître plusieurs variantes liées à ce problème (Toth et Vigo, 2001). Dans la variante la plus basique connue sous l'acronyme CVRP (Capacitated Vehicle Routing Problem) ou PTV avec contraintes de capacité, les demandes livrées sur une route ne doivent pas dépasser la capacité du véhicule qui l'assure. L'ensemble des clients visités par un véhicule désigne la tournée de celui-ci.

La variante suivante connue sous l'acronyme VRPTW (Vehicle Routing Problem with Time Windows) ou PTV avec fenêtres de temps consiste à servir chaque client durant sa fenêtre de temps. Il s'agit d'un intervalle de temps durant lequel son service doit être accompli.

Dans la variante MDVRP (Multiple Depot Vehicle Routing Problem) ou PTV à multiples dépôts, le problème comporte plusieurs dépôts dans lesquels se trouvent les véhicules. Chaque route doit commencer et finir au même dépôt. Les dépôts présentent les lieux d'approvisionnement en marchandises (chargement des véhicules) comme dans les problèmes de distribution de produits ou de déchargement de matières comme dans les problèmes de déneigement ou de balayage printanier.

Dans le VRPPD (VRP with Pick-up and Deliveries) ou le VRP avec livraison/ramassage, les véhicules doivent effectuer la livraison ainsi que le ramassage des demandes. Le ramassage augmente la complexité du problème en rapport avec la contrainte de capacité des véhicules. La Figure 2.2 présente une liste non exhaustive des principales variantes du PTV.

Figure 2. 2
Principales variantes du PTV



Source : Construction personnelle

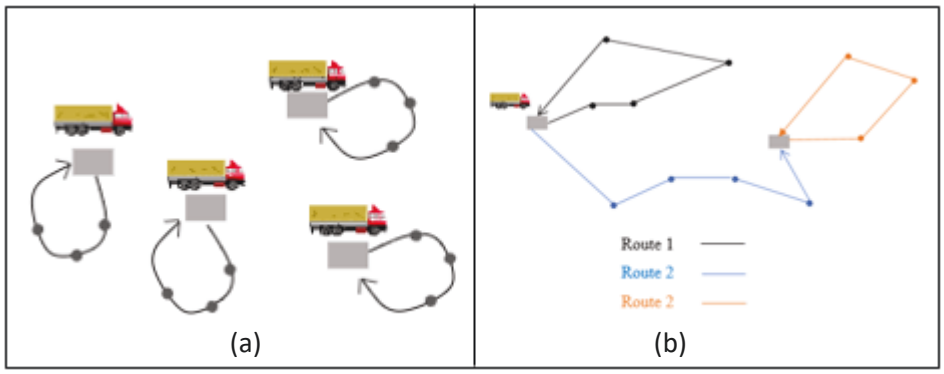
Au-delà de ces problèmes importants, il existe d'autres variantes qui résultent de la combinaison de plusieurs contraintes et qui offrent des modèles mathématiques différents. Par exemple, le problème prenant en compte les contraintes de dépôts multiples et les contraintes de fenêtre de temps est appelé MDVRPTW (Multiple Depot Vehicle Routing Problem with Time Window).

2.1.3. Différences et similitudes entre notre problème et les travaux existants

Au niveau de notre problème, le service de balayage s'effectue avec une seule flotte de véhicules, composée de balayeuses et de camions, qui quitte le dépôt de départ, réalise le balayage des tronçons requis et doit retourner à la fin de chaque quart de travail au dépôt le plus proche qui peut être différent de celui de départ. Dans notre étude, nous disposons de plusieurs dépôts qui vont servir pour changer d'équipe à la fin de chaque quart de travail nocturne et diurne. La durée de chaque quart ne doit pas dépasser une durée bien déterminée T et le service s'effectue sur une plage horaire spécifique qui dépend du type de chaque tronçon à balayer, c'est-à-dire que les tronçons de type autoroute ne peuvent être servis que pendant un quart nocturne, alors que le reste des tronçons peuvent être servis dans n'importe quel quart. Le quart suivant doit commencer à partir du dernier dépôt visité. Ainsi, notre problème s'apparente à un

MDARPFED (Multiple Depot Arc Routing Problem with Flexible End Depot) avec différents types d'arcs ou MDARP avec un retour flexible au dépôt et différents types d'arcs. Nous présentons dans la Figure 2.3 la différence entre la notion classique du MDARP (a) et notre problème (b).

Figure 2. 3
Différence entre la notion classique du MDARP (a) et notre problème (b)



Source : Construction personnelle

Le MDARPFED avec différents types d'arcs (Figure 2.3(b)) est différent de la notion classique du MDARP (Figure 2.3(a)) qui impose le retour vers le même dépôt de départ. Cette variante n'a été traité dans la littérature que par Li et al. (2014) et Markov et al. (2016) tout en respectant les contraintes de fenêtres de temps, de capacité limitée des véhicules et de la durée maximale d'une route.

La deuxième différence existe au niveau des tronçons qui doivent être servis selon leurs types. Cette variante est différente de la définition du ARPTW vu que le service doit s'effectuer en fonction du type du tronçon. Nous résumons dans le Tableau 2.1 les principales différences et similarités entre notre problème et les travaux présentés dans la littérature.

Nous avons par la suite entrepris une revue de littérature exploratoire afin d'examiner les méthodes approximatives ainsi que les principaux travaux sur le MDVRP (incluant aussi le MDARP).

Tableau 2. 1
Les principales similarités et différences entre notre problème et les travaux présentés dans la littérature

Type de problème	**Explication**	**Lien avec notre problème**
Problème du postier chinois	Servir tous les arcs d'un graphe une seule fois tout en minimisant la distance totale parcourue.	Notre problème s'apparente à un problème du postier rural puisque seulement un sous ensemble des arcs du réseau sont à balayer alors que le reste des arcs peuvent être seulement parcourus sans être balayés.
Problème du postier rural	Un sous-ensemble d'arcs doit être servi tout en minimisant la distance totale parcourue.	
Les contraintes	**Différences**	
	Les problèmes traités dans la littérature	**Notre problème**
Min Max k-véhicules	k véhicules vont servir les arcs. L'objectif est de minimiser le temps maximal de la plus longue route.	Dans notre cas, nous travaillons avec une seule flotte d'équipement synchronisée (camions et balayeuse) qui exécute les opérations de balayage et nous souhaitons minimiser le temps de fin d'exécution des opérations et le nombre de quarts de travail.
Unique dépôt/Multiple dépôts/dépôts intermédiaires	Il existe des problèmes où il y a un départ et un retour vers le même unique dépôt. D'autres problèmes comportent plusieurs dépôts et un retour vers le dépôt de départ pour chaque véhicule. Une autre variante comporte des dépôts intermédiaires qui n'est pas beaucoup traitée dans la littérature. Elle consiste à se déplacer vers ces dépôts intermédiaires pour s'approvisionner en matières et retourner à la fin du service vers le dépôt (garage) initial.	Plusieurs dépôts sont disponibles. La flotte commence le service d'un dépôt et finit le travail dans un dépôt qui peut être le même que celui du départ ou bien un autre dépôt. La flotte doit commencer un nouveau quart (route) du dépôt du fin du quart précédent. On a une flexibilité d'affectation au niveau du dépôt d'arrivé. Cette contrainte est très peu étudiée au niveau de la littérature.

Capacité limitée/hétérogène de chargement des véhicules	Comme dans les problèmes d'épandage d'abrasifs, les camions ont une capacité limitée de chargement en sel.	Généralement dans les problèmes de balayage, les camions qui seront remplies se déplacent vers les lieux d'enfouissement ou les zones dédiées pour faire le déchargement des balayures. Dans notre étude, il n'y aura pas une rupture des opérations de balayage pour attendre le retour du camion déchargé. Un autre camion vide se joint à la balayeuse dans le bon moment et remplace l'autre camion totalement chargé.
Vitesse de véhicules hétérogènes.	Les véhicules opèrent à des vitesses différentes.	Pour la même flotte d'équipement, nous considérons deux types de vitesse pour le problème de balayage. Une vitesse des déplacements entre les arcs ou bien entre les dépôts et les arcs et une vitesse de balayage qui dépend du système de balayage.
Interdiction de stationnement	Des restrictions sur le stationnement sont appliquées sur quelques routes et pendant des plages horaires bien spécifiées.	Cette contrainte n'est pas à considérer dans notre problème.
Les fenêtres de temps	Il existe des arcs avec des fenêtres de temps durant lesquelles le service doit être accompli.	Dans notre cas, les autoroutes sont desservies uniquement durant un quart nocturne, tandis que le balayage des autres routes peut être effectué de jour ou de nuit. Cette contrainte n'est pas abordée dans la littérature.
	Similarités	
Durée maximale d'une route (contrainte de temps)	Une durée prédéfinie ne doit pas être dépasser, c'est-à-dire, la durée maximale de chaque quart doit être respectée et la flotte de véhicules doit retourner au dépôt pour changer d'équipe.	
Service unique	Chaque arc est servi une seule fois.	

Source : Construction personnelle

2.2. LES MÉTHODES DE RÉSOLUTION DES PROBLÈMES DE TOURNÉES DE VÉHICULES

Les méthodes de résolution des problèmes de tournées de véhicules (PTV) se déclinent en deux grandes catégories : les méthodes exactes (par exemple, la méthode de séparation et évaluation progressive, la génération de colonnes et la génération de coupes) et les méthodes approximatives (heuristiques et méta-heuristiques). Les méthodes exactes génèrent des solutions optimales, mais nécessitent un temps de résolution excessif lorsque la dimension et la complexité du problème augmentent (Sharma et Saini, 2020). Par conséquent, elles sont généralement utilisées pour résoudre des problèmes de petite taille (Han et Cueto, 2015). Les méthodes approximatives, quant à elles, ne sont pas limitées par la taille ou la complexité du problème mais elles ne garantissent pas l'obtention d'une solution optimale (Elshaer et Awad, 2020). Elles permettent de trouver une solution de bonne qualité en un temps raisonnable. Selon une revue de la littérature sur le MDVRP, Sharma et Saini (2020) montrent qu'environ 25 % des chercheurs ont développé des méthodes exactes, 33% ont développé des heuristiques et 42% ont développé des métaheuristiques pour résoudre le MDVRP. Nous résumons à la fin de cette partie dans le Tableau 2.2 quelques travaux de MDVRP classés selon la méthode de résolution.

Dans notre étude, nous nous intéressons aux méthodes approximatives et plus particulièrement aux métaheuristiques, car le problème étudié devient difficile à résoudre par des méthodes exactes lorsque la taille des instances et le nombre de contraintes augmentent. Les métaheuristiques les plus utilisées dans la littérature sont présentées dans les sous-sections qui suivent.

2.2.1. Les algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques, connus sous l'acronyme AG ou GA (Genetic Algorithm), tentent de trouver des solutions potentielles en imitant l'évolution naturelle (Holland, 1975). La première étape consiste à générer aléatoirement une population de

n chromosomes (solutions initiales). Puis, deux chromosomes sont sélectionnés en fonction de leur valeur de la fonction d'évaluation. Cette fonction mesure la performance de chaque chromosome ce qui offre la possibilité de le comparer par rapport aux autres chromosomes. Par la suite, un opérateur de croisement est appliqué pour générer une solution qui hérite une partie de la structure de chaque chromosome. Finalement, un opérateur de mutation agit sur cette solution en modifiant une partie de sa structure. La solution finale créée sera placée dans la nouvelle population. Les opérateurs de sélection, de croisement et de mutation seront répétés sur la population actuelle jusqu'à ce que la nouvelle population soit complète. Ce type de métaheuristique est complexe à implémenter mais elle permet d'obtenir de très bonnes solutions (Katoch et al., 2021). Toobaie et Haghani (2004) ont proposé un AG pour résoudre un problème de déneigement avec une contrainte de capacité CVRP qui minimise le nombre de véhicules et les déplacements non productifs. L'algorithme divise en premier le réseau en sous-groupes puis équilibre ces sous-groupes en permutant les arcs entre les routes. Jeon et al. (2007) ont proposé un AG pour résoudre un MDVRP qui minimise la distance totale parcourue par les véhicules en considérant la contrainte d'hétérogénéité au niveau de la capacité des véhicules. Plusieurs autres auteurs tels que Abubakar et Amina (2021) et Mahmud et Haque (2019) ont proposé des AG pour résoudre un MDVRP. D'autres auteurs tels que Ghoseiri et Ghannadpour (2010), Samanta et MK (2013), Shen et al. (2018) et Yang, (2008) ont développé des AG pour résoudre un MDVRPTW. Li et al. (2014) ont proposé un AG pour résoudre le MDVRPTW avec un retour flexible aux dépôts et une hétérogénéité au niveau de la flotte. Cerrone et al. (2014) ont résolu un problème de balayage des rues en développant un AG qui minimise la distance totale parcourue par les balayeuses en respectant les contraintes de temps imposées par les règlements de stationnement, le balayage d'un seul côté de la route par jour et le retour vers l'unique dépôt. Weng et al. (2024) ont résolu le MDVRP pour la logistique d'urgence via une heuristique hybride à base d'algorithme génétique afin de minimiser le temps de secours maximal. Li et Li (2022) ont traité un MDVRP de livraison de produits périssables avec fenêtres de temps mixtes via un algorithme hybride combinant AG et recherche locale pour minimiser une

combinaison pondérée des coûts de transport et des pénalités de non-respect des fenêtres de temps, sous contraintes de péremption. Choi et al. (2026) ont étudié le MDVRP avec des fenêtres de temps et des dépôts mobiles en utilisant un algorithme génétique avec l'objectif de minimisation du coût total. Kabadurmus et Erdogan (2023) ont proposé un algorithme génétique pour résoudre un MDVRP vert avec plusieurs tournées, flotte hétérogène et livraisons fractionnées. L'objectif était de minimiser les émissions totales de carbone.

2.2.2. La recherche tabou

La recherche tabou, connue sous l'acronyme RT ou TS (Tabu Search), a été introduite par Glover (1989, 1990). Son objectif consiste à continuer à explorer l'espace des solutions même si un optimum local est trouvé et ce en permettant des mouvements qui n'améliorent pas la solution courante et en utilisant le principe de mémoire pour éviter les mouvements cycliques (Repoussis et al., 2009). La mémoire est représentée par une liste taboue qui empêche temporairement les cycles en mémorisant les k dernières solutions afin d'éviter de répéter ces mouvements induisant à ces k dernières solutions. Cette procédure se répète jusqu'à une condition d'arrêt soit atteinte (temps d'exécution ou nombre maximal d'itération). Ce type de métaheuristique a donné lieu à de multiples algorithmes efficaces (Archetti et al., 2014; Cordeau et al., 1997, 2001, 2004). Plusieurs chercheurs ont proposé des métaheuristiques de recherche tabou pour résoudre le problème de tournées des véhicules à multiples dépôts (MDVRP). Par exemple, Cordeau et al. (2001) ont proposé une métaheuristique de RT avec un objectif de minimisation du nombre de véhicules. Parthanadee et Logendran (2006) ont proposé trois heuristiques de RT de différentes mémoires pour étudier un problème de distribution périodique de multiples produits à moindre coût. Zhang et al. (2020) ont développé une métaheuristique de RT adaptative combinée à six structures de voisinage pour résoudre un MDVRPPD afin de minimiser le coût total de transport. Paul et al. (2021) ont résolu un MDVRPTW afin de minimiser la distance totale parcourue avec une métaheuristique de RT combiné avec une métaheuristique de

recherche à voisinage variable. Becker et al. (2026) ont formulé une métaheuristique de RT pour le MDVRP via un processus basé sur des règles statistiques afin de minimiser le coût total des tournées avec des contraintes de capacité. Luo et al. (2024) ont proposé une recherche tabou à voisinage variable pour le MDVRP en contexte épidémique, équilibrant coût, risque de contagion et contraintes temporelles pour minimiser le coût de transport. Song et al. (2023) ont développé une recherche tabou hybride à voisinage variable pour le MDVRP, avec mécanismes de diversification adaptatifs et opérateurs de voisinage dynamiques afin de minimiser le coût total de routage sous contraintes de capacité.

2.2.3. La recherche à voisinage variable

La métaheuristique de recherche à voisinage variable, connue sous l'acronyme RVV ou VNS (Variable Neighborhood Search), a été introduite par Hansen et al. (2010) et Mladenović et Hansen (1997). Elle utilise plusieurs types de voisinages et se base sur le changement systématique de voisinage au sein d'une recherche locale (Hansen et al., 2010; Mladenović et Hansen, 1997). Une procédure de recherche locale est une procédure itérative qui identifie, pour une solution initiale s, un optimum local par rapport à un voisinage V(s) qui représente un sous ensemble de solutions qu'il est possible de les atteindre au cours de la recherche. Soit L = (V(1), …, V(T)) une liste finie de voisinages, où V(t)(s) est l'ensemble des solutions dans le t^{ieme} voisinage de s. Le changement de voisinage peut être réalisé à l'étape d'intensification au sein de laquelle une recherche locale permet de converger vers un optimum local, et à l'étape de diversification mise en place pour s'en échapper. Le changement systématique de voisinage se base sur la comparaison de la fonction objectif notée Z de la solution courante s par rapport à la solution temporaire générée s'. Pour un objectif de minimisation, si Z(s') < Z(s) alors s' devient la nouvelle solution courante et t sera réinitialisée sinon la solution courante reste inchangée et t sera incrémenté de 1.
Tagmouti (2009) et Tagmouti et al. (2007) ont développé une métaheuristique de type descente à voisinage variable ou VND (Variable Neighborhood Descent) pour résoudre

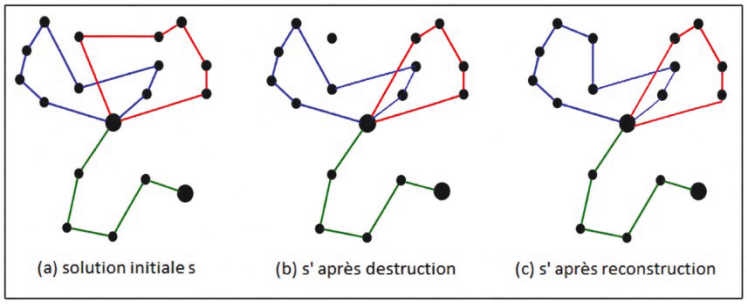
un problème de déneigement avec des coûts variables. Les mouvements dans le voisinage d'une solution sont des échanges des arcs ou blocs d'arcs entre les routes. Polacek et al. (2004) ont proposé une métaheuristique RVV pour résoudre un problème de tournées des véhicules à multiples dépôts et avec des fenêtres de temps MDVRPTW. Les auteurs ont utilisé la structure de voisinage d'échange de deux arcs entre les routes. Schmid et al. (2010) ont étudié des cas réels en industrie et ils ont appliqué la RVV pour construire une solution initiale et l'améliorer par la suite avec un objectif de minimisation des coûts de transport. Sadati et Çatay (2021) ont résolu un problème de MDGVRP (Multiple Depot Green VRP) où la flotte de véhicules utilise un carburant alternatif. L'objectif de leur étude était la minimisation de la distance totale et le respect de la contrainte de durée totale de la route à travers la métaheuristique RVV combiné avec une RT. Bezerra et al. (2018) ont étudié un MDVRP avec un objectif de minimisation du coût total à travers le développement d'une métaheuristique RVV combiné avec un algorithme de recherche locale adaptative. Sadati et al. (2021) ont résolu plusieurs classes du problème MDVRP avec une métaheuristique RVV combinée avec une RT. Markov et al. (2016) ont proposé une métaheuristique RVV pour résoudre leur problème caractérisé par une flotte hétérogène et une affectation flexible des véhicules aux dépôts en présence d'installations intermédiaires. Li et Meng (2025) ont développé une métaheuristique RVV bi-objectif pour un MDVRP avec dépôts hétérogènes afin de minimiser le coût total de routage et équilibrer la charge de travail entre les véhicules. Londoño et al. (2024) ont proposé une approche hybride pour le MDVRP visant à minimiser la distance totale parcourue tout en équilibrant la longueur des routes entre les véhicules. La méthode combine un algorithme génétique avec une RVV.

2.2.4. La recherche adaptative à grand voisinage

La métaheuristique de recherche adaptative à grand voisinage, connue sous l'acronyme RAGV ou ALNS (Adaptive Large Neighborhood Search), a été introduite par Ropke et Pisinger (2006) pour résoudre un problème de VRPPDTW. Elle est

considérée parmi les méthodes de résolution les plus efficaces pour résoudre le PTV (Gendreau et Potvin, 2010). Cette métaheuristique permet à plusieurs opérateurs de destruction et reconstruction à modifier la solution courante. Un opérateur de destruction est une fonction qui agit sur la solution courante en supprimant certains de ces éléments et retournant une solution temporaire partiellement détruite. Quant à l'opérateur de reconstruction, il réinsère dans d'autres positions les éléments supprimés dans la solution temporaire partiellement détruite et il retourne une solution temporaire réalisable. Initialement, les opérateurs de destruction et reconstruction sont tous équiprobables. Puis, selon leurs performances au cours de la résolution, leurs probabilités sont mises à jour. Le choix d'un opérateur est contrôlé d'une façon dynamique en fonction de sa performance passée. La figure 2.4 illustre le fonctionnement de cette métaheuristique.

Figure 2. 4
Démarche de destruction et reconstruction



Source : Construction personnelle

La Figure 2.4 (a) montre une solution initiale s avec deux dépôts et trois quarts de travail dont l'un (en couleur vert) effectue un retour flexible vers un dépôt différent de celui de départ. La Figure 2.4 (b) présente la solution temporaire s' générée à partir de s en appliquant l'un des opérateurs de destruction et en enlevant un nœud. La Figure 2.4 (c) montre la solution s' après l'application de l'un des opérateurs de reconstruction.

Quelques chercheurs ont utilisé cette métaheuristique pour résoudre un problème de tournées sur les arcs. Salazar-Aguilar et al. (2012) ont utilisé la

métaheuristique de RAGV pour un problème de tournées sur les arcs avec synchronisation entre les véhicules tout en respectant les contraintes de retour vers l'unique dépôt de départ et assurer que tous les véhicules servant le même arc commencent en même temps le service (mode synchrone). Laporte et al. (2010) ont résolu un problème de tournées sur les arcs en présence d'une contrainte de capacité à travers la RAGV. Pisinger et Ropke (2007) ont étudié un problème de VRPPDTW et ont développé une métaheuristique de RAGV qui minimise le coût total en considérant les contraintes de capacité et d'intervalles de temps. Alinaghian et Shokouhi (2018) ont développé une métaheuristique de RAGV afin de minimiser le coût et la distance totale pour un MDVRP tout en respectant la contrainte de capacité maximale des véhicules et la distance maximale à parcourir pour chaque route. Lahyani et al. (2019) ont résolu un MDOVRP (Multiple Depot Open VRP) dans lequel les véhicules quittent les dépôts sans l'obligation d'y retourner à la fin de la route avec un objectif de minimisation de la distance totale parcourue. Quirion-Blais et al. (2017) ont développé une métaheuristique de RAGV pour résoudre un problème de déneigement et d'épandage d'abrasifs qui minimise la durée totale des opérations. Les arcs doivent être servis selon une certaine priorité d'exécution. Les arcs de type commercial en premier, de type résidentiel en second puis de type rural à la fin. Les contraintes de restriction de virage, équilibrage des routes et les vitesses variables des véhicules doivent être aussi respectées. Ye et al. (2025) ont proposé un MDVRP avec réapprovisionnement collaboratif entre dépôts et ont développé un algorithme hybride ALNS pour résoudre le problème. Voigt et al. (2022) ont développé une ALNS hybride pour résoudre un MDVRP afin de minimiser le coût total. Wu et al. (2025) ont proposé une ALNS pour un MDVRP vert où les entreprises partagent leurs dépôts dans l'objectif de minimiser les émissions totales de carbone et les coûts de transport.

En résumé, cette revue montre que le problème étudié s'apparente à une variante peu explorée du MDARP. Les travaux existants ne considèrent pas simultanément l'ensemble des caractéristiques du problème de balayage étudié, ce qui justifie le développement d'un nouveau modèle et d'une nouvelle méthode de résolution.

Tableau 2. 2
Principaux travaux de MDVRP

Méthodes de résolution	**Références**	**Fonction objectif (Minimiser)**	**Les contraintes**			
			Retour au même dépôt	Capacité limitée	Fenêtre de temps	Durée totale
RT	Cordeau et al. (2001)	Nombre de véhicules	✓	✓	✓	
	Crevier et al. (2007)	Durée de chaque route	✓	✓		✓
	Parthanadee et Logendran (2006)	Coût total	✓	✓	✓	
	Paul et al. (2021)	Distance totale	✓	✓	✓	✓
	Becker et al. (2026)	Coût total	✓	✓		
	Luo et al. (2024)	Coût total	✓	✓		
	Song et al. (2023)	Coût total	✓	✓	✓	
AG	Surekha P et Sumathi (2011)	Distance totale	✓	✓		
	Bolaños et al. (2018)	Coût total	✓	✓		
	Zhou et al. (2018)	Coût total	✓	✓		✓
	Azadeh et Farrokhi-Asl (2019)	Coût total	✓	✓		
	Ramachandiran et al. (2019)	Distance totale	✓	✓		
	Abubakar et Amina (2021)	Coût total	✓	✓		
	Li et al. (2014)	Coût total		✓	✓	✓
	Weng et al. (2024)	Durée totale	✓	✓	✓	
	Li et Li (2022)	Durée totale	✓	✓	✓	
	Choi et al. (2026)	Coût total	✓		✓	

	Kabadurmus et Erdogan (2023)	Émissions de carbone	✓	✓		
RAGV	Mancini (2016)	Coût total	✓	✓	✓	✓
	Polacek et al. (2008)	Distance totale	✓	✓		✓
	Lahyani et al. (2019)	Coût total		✓	✓	✓
	Alinaghian et Shokouhi (2018)	Coût et distance totale	✓	✓		
	Ye et al. (2025)	Coût total	✓			
	Voigt et al. (2022)	Coût total	✓	✓		
	Wu et al. (2025)	Coût total et émissions	✓	✓	✓	
RVV	Salhi et al. (2014)	Coût total	✓	✓		
	Sadati et Çatay (2021)	Distance totale	✓			✓
	Nunes Bezerra et al. (2018)	Coût total	✓	✓		✓
	Kuo et Wang (2012)	Distance totale	✓	✓		
	Markov et al. (2016)	Coût et durée total		✓	✓	✓
	Li et Meng (2025)	Coût total	✓	✓		
	Londoño et al (2024)	Distance totale	✓	✓		
Heuristiques	Kinable et al. (2016)	Durée totale	✓	✓		
	Chiu et al. (2006)	Durée totale	✓	✓	✓	
	Afshar-Nadjafi et Afshar-Nadjafi (2017)	Coût total	✓	✓	✓	✓

Source : Construction personnelle

2.3. INNOVATION AU NIVEAU DES PME

Dans cette sous-section, le concept général d'innovation est d'abord défini. Par la suite, une revue de littérature exploratoire est réalisée afin d'examiner l'innovation au niveau des marchés publics, les barrières qui empêchent son adoption ainsi que son application au niveau du service de balayage.

2.3.1. Définition de l'innovation et ses différents types

L'innovation est un concept multidimensionnel défini comme le processus de développement et d'implémentation réussie de nouvelles idées, produits, services ou processus générant une valeur ajoutée (Taylor, 2017). Elle est généralement perçue comme un processus créatif qui traduit les idées innovantes en résultats qui améliorent l'efficience, l'efficacité ou l'impact social et économique (Stundziene et al., 2024). L'innovation est ainsi associée à la créativité, à la nouveauté et à la création de valeur.

Schumpeter fut le premier auteur qui a introduit l'innovation comme moteur de développement économique dans son ouvrage fondateur, Théorie du développement économique, publié en 1911 (réédité avec introduction de Richard Swedberg, 2021). Il explique qu'elle crée des destructions créatrices qui transforment les industries. Gault (2018) a définit l'innovation comme une condition de survie des organisations. Autrement dit, elle est indispensable pour les organisations souhaitant rester compétitives sur le marché. D'autres auteurs indiquent que l'innovation doit se concentrer autant sur les produits/services que sur les processus afin de garantir une compétitivité sur le long terme, où les organisations prennent des actions, développent des méthodes et améliorent les idées d'une façon continue (Chupina et al., 2023; Lugovoi et al., 2022). L'innovation signifie également un vecteur de croissance pour les organisations car elle aide les gestionnaires à atteindre les objectifs d'amélioration continue et de développement durable (Gao et al., 2017). Elle répond donc aux menaces réelles de la concurrence (Cornett et al., 2019).

L’innovation est considérée comme complexe et dynamique, car elle touche plusieurs disciplines comme les technologies, la gestion, l’économie et la sociologie (Taylor, 2017). Elle peut prendre différentes formes, telles que l’innovation en produits, en processus, en services, technologique, managériale, en modèles d’affaires, en chaine d’approvisionnement ainsi que l’éco-innovation et l’innovation ouverte (Stundziene et al., 2024).

L’innovation en produits est définie comme le développement d’un nouveau produit ou l’amélioration d’un produit existant à travers le changement du design, des fonctionnalités ou des caractéristiques (Chupina et al., 2023; Galindo et Méndez, 2014; Markovic et Bagherzadeh, 2018). Elle se concentre sur la création de la valeur, qu’elle soit tangible ou intangible. En parallèle, l’innovation en processus implique l’amélioration au niveau des méthodes de travail ou l’introduction de nouveaux changements au niveau des techniques de travail qu’il s’agisse des outils, du workflow ou de la gestion des ressources (Aslam et al., 2023; Bartelsman et al., 2018; Lugovoi et al., 2022). Son objectif est d’améliorer l’efficience, la qualité ou la flexibilité au niveau des opérations.

L’innovation en service porte sur l’amélioration de l’expérience utilisateur ou l’introduction de nouveaux modes de prestation tels que la personnalisation des options ou même la digitalisation des servies (Corona-Treviño, 2023; Janssen et al., 2016; Kitsios et Grigoroudis, 2020). L’innovation technologique, quant à elle, désigne le développement ou l’amélioration de technologies appliquées à des produits, des processus ou des services (Chen et al., 2024; Geldes et al., 2017). Elle permet aux organisations de renforcer leur avantage concurrentiel sur le marché, d’améliorer leur efficience, de réduire les coûts ou d’augmenter leur rentabilité (Chatzoglou et Chatzoudes, 2018; Xiuping et Yang, 2022).

L’innovation managériale touche aux transformations des structures ou des pratiques organisationnelles (Damanpour, 2014). Elle englobe l’introduction de

nouvelles méthodes de coordination, de prise de décision ou de gouvernance, produisant des changements au niveau des procédures de gestion des organisations et leurs systèmes administratifs (Ghosh et Srivastava, 2022; Henao-García et Cardona Montoya, 2024; Heyden et al., 2018). L'innovation en modèles d'affaires consiste à revoir les mécanismes de création et de captation de valeur (Clauss, 2017; Foss et Saebi, 2017), notamment par de nouveaux segments de clientèle, de nouvelles logiques de positionnement au niveau du marché, des approches tarifaires distinctes ou une restructuration des coûts (Hock-Doepgen et al., 2021; L. Liu et al., 2024).

L'innovation dans les chaines d'approvisionnement concerne l'amélioration des activités logistiques, des approvisionnements ou de la collaboration entre fournisseurs, distributeurs, industries et clients, afin d'optimiser les flux physiques, informationnels et de services (Abdallah et al., 2021; Arlbjørn et al., 2011; Calabrese et al., 2024). L'innovation verte, ou éco-innovation, vise le développement de solutions réduisant les impacts environnementaux, comme la consommation d'énergie ou les émissions de GES, tout en renforçant la durabilité des produits, des processus et des pratiques organisationnelles (García-Granero et al., 2018; Ghisetti et Pontoni, 2015; Munodawafa et Johl, 2022; Su et al., 2024). Enfin, l'innovation ouverte repose sur la collaboration avec des partenaires ou clients externes pour cocréer de nouvelles solutions, favorisant la diffusion rapide des connaissances et des idées (Chesbrough, 2003; Chesbrough et Bogers, 2014; Lima Rua et al., 2023).

Ces différentes formes d'innovation peuvent être incrémentales ou disruptives (Stundziene et al., 2024). L'innovation incrémentale implique des améliorations continues aux produits, processus ou services existants, ce qui permet de maintenir la compétitivité et d'assurer une croissance soutenue à long terme (Kochetkov, 2023). Cependant, l'innovation disruptive introduit des ruptures majeures capables de transformer des secteurs ou des marchés entiers (Hang et Chen, 2021).

2.3.2. Les limites liées à l'innovation

Les PME sont confrontées à une série d'obstacles qui les empêchent généralement d'innover ou de changer leurs pratiques. Les contraintes financières et matérielles sont parmi les obstacles les plus mentionnés au niveau de la littérature (Akpan et al., 2021; Fanelli, 2021; Indrawati et al., 2020; Ingaldi et Ulewicz, 2019; Kumar et al., 2023). Mugogo et Midala (2020) ont montré que les limites budgétaires et les coûts élevés associés à l'innovation constituent les principales limites pour les PME. Les fonds internes insuffisants les empêchent de financier des activités de R&D. En outre, la Commission européenne (2021) a mené une enquête et a montré que, particulièrement pour les petites entreprises, la capacité financière est l'obstacle dominant de l'innovation. L'accès aux ressources financières est l'obstacle le plus pressant pour les PME et les résultats des investissements liés à l'innovation sont incertains (Indrawati et al., 2020). Le succès ou l'échec d'une innovation dépend des soutiens financiers et techniques fournis par les autorités publiques et locales aux PME (Fanelli, 2021).

Au-delà des limites financières, les problèmes de compétences comme le manque de personnel qualifié et la faible capacité de gérer l'innovation freignent cette dernière (Ibarra et al., 2020). Les PME rencontrent des difficultés à recruter des profils spécialisés et à maintenir un certain niveau d'expertise à l'interne (De Mattos et al., 2023). Durrani et al. (2024) ont montré que ces lacunes ralentissent l'adoption de l'innovation. Il est difficile de recruter du personnel compétent en raison de la non-disponibilité de ces professionnels et des perspectives de carrière limitées offertes par les PME (Birkel et al., 2019). Par conséquent, trouver et recruter ces profils est un défi important pour les PME (Lu et al., 2022). Paes et al. (2025) ont indiqué que le manque de ressources humaines et financières complique l'adoption des technologies. Donc en plus des ressources financières, l'absence de personnel spécialisé pour l'acquisition de nouvelles technologies a été identifié comme un obstacle majeur (Ingaldi et Ulewicz, 2019).

Également, les dynamiques organisationnelles et culturelles des PME présentent un autre type d'obstacles. Le manque de partage de connaissances et les résistances aux changements constituent des freins importants (Coreynen et al., 2017; Costa et al., 2023; De Marco et al., 2020). La priorité de certains dirigeants est la performance économique en privilégiant les décisions qui visent à maximiser les profits et à maintenir la viabilité de leur PME, ce qui limitent les décisions d'investissement (Kannan et Gambetta, 2025; Saudi et al., 2019). Omowole et al. (2024) a noté par exemple la complexité d'intégration technologique et les résistances au changement dans certains projets. Cette résistance est difficile à gérer au niveau des PME a l'inverse dans les grandes entreprises car l'impact d'un seul individu y est beaucoup plus important (Bourdon et Jaouen, 2016). Les employés peuvent manquer d'engagement vers l'innovation vu la charge supplémentaire qu'elle implique (Teoh et al., 2025).

En outre, les difficultés d'accès au marché et au savoir présentent des obstacles externes (Apostolov et Coco, 2020). Mugogo et Midala (2020) ont indiqué un manque d'information sur les technologies, l'avancement en R&D, les besoins du marché ainsi qu'une collaboration limitée avec les milieux de recherche. Le manque de ressources aussi implique des difficultés pour entrer à un nouveau marché (Yang et al., 2019). Les PME dépourvues de connaissances à l'avance sur les technologies connaissent un processus de transformation progressif (Mohapatra et Thakurta, 2019; Müller et al., 2018; Shin, 2017). Les gestionnaires peuvent ne pas être au courant des nouvelles technologies, ce qui mène à une non-adoption (Azevedo et almeida, 2021; Kumar et al., 2023; Nichifor et al., 2022). Pour promouvoir l'innovation, les PME devraient prendre en compte la culture organisationnelle, la disponibilité de financements, la présence d'une équipe compétente de R&D et les outils nécessaires (Gulia et al., 2025).

Dans les services d'entretien routier comme le déneigement ou le balayage printanier, ces obstacles sont souvent accentués par des contraintes structurelles propres au secteur comme la nature saisonnière des opérations, la compétitivité élevée, les budgets limités, les contraintes règlementaires et contractuelles rigides et que toute

amélioration doit apporter un gain réel (Bonafide Research, 2025). Par ailleurs, les prestataires de service soumis aux règles des marchés publics doivent être en mesure de réduire leurs coûts sans compromettre la qualité afin de rester compétitif.

Au niveau du service de balayage printanier, où la demande augmente en raison de l'expansion des zones urbaines et de la nécessité accrue de maintenir des espaces publics propres, des équipements de plus en plus sophistiqués sont apparus sur le marché comme les balayeuses électriques, autonomes équipées de systèmes de navigation avancée, engins intégrant des capteurs pour optimiser les trajectoires et réduire la consommation énergétique et le système novateur avec balai convoyeur de Arseno Balayage. Dans ce contexte, l'innovation technologique constitue un levier important pour permettre aux prestataires de services de maintenir leur compétitivité. Ces nouvelles technologies offrent en effet un potentiel d'amélioration de l'efficience opérationnelle, de réduction des coûts et d'accroissement de la performance globale des opérations de balayage.

Les études montrent que l'utilisation des outils d'aide à la décision améliore l'efficience opérationnelle et renforce la capacité des prestataires à innover (Shin et al., 2022). Cependant, plusieurs prestataires ne disposent pas encore d'outils d'analyse, ce qui ralenti les décisions d'investissement, l'adoption de nouvelles innovations et limite leur compétitivité. L′organisation de coopération et de développement économiques a souligné d'ailleurs que 72 % des entreprises ne possèdent pas d'outils permettant de mesurer le retour sur investissement (OECD, 2015). Également, le manque de compétences pour déployer et gérer l'innovation est un obstacle important (Cinar et al., 2019, 2021). Le manque d'outils analytiques adéquats rend aussi plus difficile l'évaluation des économies à long terme liés à l'adoption de technologies plus performantes. Le recours à un cadre d'aide à la décision et des approches quantitatives peut toutefois permettre de quantifier les gains potentiels, de justifier des investissements et de renforcer la compétitivité des prestataires, tout en améliorant la qualité du service offert.

2.3.3. Aspects techniques et opérationnels des brosses de balayage

Plusieurs études se sont concentrées sur les aspects de performance technique des brosses de balayage en termes d'efficience de balayage ou bien sur les aspects opérationnels de balayage comme la minimisation de la distance parcourue, la consommation de carburant ou le temps des opérations sans considérer les implications économiques. Ces études ont analysé la vitesse de balayage sous plusieurs angles techniques comme l'efficacité des brosses, la réduction et la détection des polluants, ainsi que la conception et le fonctionnement des systèmes d'aspiration. La vitesse de balayage est intégrée comme paramètre opérationnel, fixe ou variable, dans l'objectif d'évaluer la qualité de balayage. À la fin de cette section, le Tableau 2.3 présente une synthèse sur les diverses études sur l'innovation dans le service du balayage de rues. Vanegas-Useche et al. (2015) ont étudié l'influence de la vitesse de balayage sur l'efficacité de nettoyage avec des brosses oscillatoires. Pan et al. (2023) ont eu recours à la dynamique des fluides numérique pour démontrer que la vitesse du véhicule et les flux d'air modifient l'efficacité d'aspiration des balayeuses, révélant des compromis entre la vitesse, la qualité du nettoyage et la consommation énergétique. Yang et al. (2018) ont établi des seuils techniques montrant comment la vitesse opérationnelle conditionne la performance des brosses. En outre, Daya et al. (2022) ont utilisé un modèle d'apprentissage automatique afin d'analyser le comportement spatiotemporel d'un système de balayage. Jeong et al. (2025) ont quantifié l'impact de la variation de la vitesse de balayage sur la réduction des particules. D'autres études ont proposé, après expérimentation, une vitesse de balayage spécifique comme repère technique, par exemple 5,8 km/h pour des débris de taille moyenne selon Vanegas Useche et al. (2010), mais ces valeurs restent propres aux conditions testées et ne peuvent être généralisées. En pratique, la vitesse de balayage varie selon les règles établies par les autorités routières, la quantité de débris, l'état de la chaussée, les conditions météorologiques ou le trafic (Washington Stormwater Center, 2026). Donati et al. (2020), dans une étude sur la détection des polluants, ont observé que même si les balayeuses roulent bien plus lentement que les autres véhicules, leur vitesse de

balayage se situe tout de même entre 10 et 20 km/h. Fayzullayevich et al. (2022) ont montré que les balayeuses à air régénératif atteignent de meilleures performances avec une vitesse supérieure à 5 km/h, avec un rendement généralement maximal entre 6 et 14 km/h selon le type de débris. Wang et al. (2025) ont identifié une vitesse optimale d'environ 12 km/h qui permet d'équilibrer la consommation énergétique, le taux de nettoyage (supérieur à 90 %) et l'efficacité énergétique. Par ailleurs, l'institut national de recherche sur les eaux au Canada ont mené une étude entre 2004 et 2006 pour évaluer l'efficacité de différents modèles de balayage (mécanique et à air régénératif) dans la réduction des débris (Environnement Canada, 2007). Les résultats ont montré que les balayeuses mécaniques conventionnelles travaillent habituellement entre 8 et 15 km/h, une plage correspondant à un compromis entre efficience opérationnelle et efficacité de collecte des débris. Également, aux États-Unis, plusieurs fabricants de balais recommandent des vitesses comprises entre 4,8 et 11,2 km/h selon le type des débris et la surface des rues.

D'autres études se sont intéressées aux opérations de balayage en considérant une vitesse fixe de balayage. Les objectifs étaient principalement liés à la performance des brosses, à la réduction des polluants, à l'optimisation des itinéraires et à la conception et au fonctionnement des systèmes d'aspiration. Les indicateurs analysés portent généralement sur l'efficacité du nettoyage, la distance parcourue, la consommation d'énergie ou encore le temps des opérations. Par exemple, Abdel-Wahab et al. (2011) se sont concentrés sur la performance des brosses latérales sans étudier l'influence de variations de vitesse. De leur côté, Bartolozzi et al. (2018) ont appliqué une analyse de cycle de vie pour comparer différents services de balayage, en évaluant leurs impacts environnementaux et leurs besoins énergétiques. Das et Wiseman (2024) ont évalué la capacité du balayage à éliminer les débris, en mettant l'accent sur l'importance des pratiques opérationnelles standards pour assurer une bonne qualité de balayage. Ben Daya et al. (2024) ont quant à eux comparé les émissions de gaz à effet de serre, la consommation d'énergie et l'efficacité opérationnelle de deux systèmes de balayage à l'aide d'une simulation à événements

discrets de plusieurs scénarios. Milijaš et al. (2023) ont développé un système de contrôle visant à réduire la consommation d'eau. Rubio-Calderón et al. (2025) ont développé un modèle de simulation en dynamique des systèmes reliant la performance technique des opérations de balayage des rues aux indicateurs de perception citoyenne, afin de soutenir l'élaboration de politiques de nettoyage urbain plus durables. Dans la même perspective, Guedes et al. (2025) ont proposé un algorithme d'optimisation de l'indicateur de propreté, conçu pour refléter la perception des citoyens et ainsi appuyer la mise en place de stratégies de nettoyage plus efficaces.

Comme présenté précédemment, plusieurs études ont exploré l'amélioration de la performance du balayage par l'optimisation des itinéraires. À titre d'illustration, Parsons et al. (2025) ont proposé des heuristiques permettant de réduire les détours et d'équilibrer la charge de travail entre véhicules. Liu et al. (2024) ont conçu une heuristique en deux étapes qui consiste à déterminer les emplacements optimaux des dépôts et à établir les itinéraires des véhicules afin de desservir les arcs de rue nécessitant une intervention. Yurtseven et Gökçe (2019) ont présenté un modèle mathématique de routage pour balayeuses électriques intégrant la capacité des camions et la recharge de la batterie afin de minimiser la consommation énergétique. Parsons et al. (2024) ont développé un algorithme heuristique et génétique basé sur un réseau routier unidirectionnel afin de minimiser le temps total d'un système de balayage autonome. Dans l'ensemble de ces travaux, la vitesse de balayage demeure un paramètre fixe, ce qui empêche d'évaluer son influence sur la performance globale des opérations de balayage. Cette revue met en évidence un manque d'outils permettant de quantifier les retombées opérationnelles et économiques associées aux innovations technologiques dans le secteur du balayage, particulièrement en ce qui concerne l'augmentation de la vitesse de balayage.

Tableau 2. 3
Synthèse des travaux sur l'innovation dans le service du balayage

Vitesse de balayage	Références	Objectif						Indicateur de performance					Méthodologie
		Efficacité des brosses	Réduction des polluants	Détection des polluants	PTV	Conception du système d' aspiration	Aspiration	Efficacité du nettoyage	Distance	Consommation d' énergie	Temps de déplacement	Perception des citoyens	
Variable	Lamghari et al. (2026)				✓						✓		Heuristiques
	Wang et al. (2025)	✓						✓		✓			YOLO v5 et contrôle flou
	Daya et al. (2022)						✓		✓		✓		Apprentissage automatique
	Pan et al. (2023)					✓		✓		✓			Mécanique des fluides numérique et optimisation
	Fayzullayevich et al. (2022)					✓	✓	✓					Mécanique des fluides numérique
	Jeong et al. (2025)		✓					✓					Analyse statistique
	Donati et al. (2020)			✓				✓		✓			Apprentissage profond et contrôle par capteurs

	Yang et al. (2018)	✓						✓					Conception expérimentale et modélisation
	Vanegas-Useche et al. (2015)	✓						✓					Comparaison en laboratoire
Fixe	Rubio-Calderón et al. (2025)		✓					✓				✓	Simulation
	Guedes et al. (2025)		✓					✓				✓	Algorithme d'optimisation itératif
	Ben Daya et al. (2024)						✓		✓	✓	✓		Simulation
	Das & Wiseman (2024)		✓					✓					Échantillonnage et analyse en laboratoire
	Parsons et al. (2025)				✓				✓				Heuristiques
	Milijaš et al. (2023)		✓			✓		✓					Essais expérimentaux
	Yurtseven & Gökçe (2019)				✓					✓			Modèle mathématique
	Bartolozzi et al. (2018)						✓	✓		✓			Analyse du cycle de vie (ACV)
	Cerrone et al. (2014)				✓				✓				Algorithme génétique

Source : Construction personnelle

2.4. LES MARCHÉS PUBLICS VERTS

Cette section présente les critères environnementaux des marchés publics verts ainsi qu'une revue systématique de la littérature portant sur les principaux aspects étudiés et leur impact sur l'éco-innovation.

2.4.1. Les critères environnementaux au niveau des marchés publics verts

Plusieurs études empiriques ont montré que les critères d'attribution d'un contrat les plus fréquentes sont le prix et la qualité suivis des critères environnementaux avec une faible pondération (Cheng et al., 2018). En conséquence, leur influence sur la décision finale d'attribution du contrat demeure limitée (Igarashi et al., 2015). Traditionnellement, un marché est attribué généralement selon le prix le plus bas ou la soumission économiquement la plus avantageuse qui satisfait au mieux aux critères de prix et qualité exigés par l'autorité publique. De nouvelles approches d'attribution d'un contrat ont été élaborées particulièrement pour les marchés publics verts pour tenir compte des aspects environnementaux. Par exemple, les autorités publiques peuvent fixer un niveau minimal de performance environnementale dans les spécifications techniques puis attribuer des points supplémentaires à la soumission qui a présenté un niveau de performance environnementale supérieure aux exigences minimales définies dans les spécifications techniques (UE, 2016). L'Union Européenne a développé des critères de marchés publics verts au niveau du service de collecte des déchets incluant le service de balayage printanier. Les pouvoirs adjudicateurs sont libres de choisir, en fonction de leurs besoins, d'inclure toutes ou certaines des normes environnementales. Vu l'absence d'une définition universelle des critères environnementaux, nous nous référons à la boîte à outils des marchés publics verts développée par la Commission européenne présentée dans le Tableau 2.4. Cette dernière identifie deux types de critères essentiels et complets. Une norme verte est considérée comme critère essentiel si elle n'augmente pas les coûts et la complexité de l'appel d'offres tandis que les critères complets sont plus exigeants concernant la performance du soumissionnaire ce qui augmente les coûts et la complexité de l'appel d'offres (Testa et al., 2015).

Tableau 2. 4
Boîte à outils des marchés publics verts développée par Commission Européenne (2021)

Critères essentiels	Critères complets
Spécifications techniques	
ST1. Réduction des émissions de GES : Solution 1 : L'autorité publique indiquera les itinéraires qui doivent être servis par des véhicules équipés de l'une des technologies suivantes : des véhicules hybrides fonctionnant au diesel ou au gaz naturel, véhicules équipés de systèmes d'accumulation d'énergie, véhicules équipés de correcteurs automatiques de freinage, véhicules équipés de dispositifs de levage de bennes électriques, véhicule rechargeable, véhicule bicarburant au gaz naturel, véhicules au gaz naturel à injection directe haute pression, véhicules électriques ou véhicules à pile à combustible à l'hydrogène. Solution 2 : Selon l'année de lancement de l'appel d'offre, la flotte doit être équipée du pourcentage indiqué de véhicules équipés d'une des technologies figurants dans la solution 1 des critères essentiels. (Pour l'année 2021, 36% des véhicules doivent être équipés d'une de ces technologies).	ST1. Réduction des émissions de GES : Solution 1 : L'autorité publique indiquera les itinéraires qui doivent être servis par des véhicules équipés de l'une des technologies suivantes : véhicule rechargeable, véhicule bicarburant au gaz naturel, véhicules au gaz naturel à injection directe haute pression, véhicules électriques ou véhicules à pile à combustible à l'hydrogène. Solution 2 : Selon l'année de lancement de l'appel d'offre, la flotte doit être équipée du pourcentage indiqué de véhicules équipés d'une des technologies figurants dans la solution 1 des critères essentiels. (Pour l'année 2021, 48% des véhicules doivent être équipés d'une de ces technologies).
ST2. Systèmes de contrôle de la pression des pneumatiques Les véhicules doivent être équipés d'un système de contrôle de la pression des pneumatiques installé sur le véhicule et capable de fournir les variations de pression dans le temps.	
ST3. Pneumatiques des véhicules — résistance au roulement Les véhicules doivent être équipés de pneumatiques conformes pour la résistance au roulement.	
ST4. Carburants L'adjudicateur peut définir un niveau d'alimentation en carburant renouvelable pour les véhicules au gaz naturel. Au moins 15 % du méthane doit être renouvelable.	

ST5. Émissions de polluants atmosphériques Pour chacune des années du lancement de l'appel d'offres, voici le pourcentage des véhicules qui doivent respecter la norme sur les émissions : • 2022 : 72% • 2023 : 80% • 2024 : 88%	ST5. Émissions de polluants atmosphériques Pour l'année 2022, le pourcentage des véhicules qui doivent respecter la norme sur les émissions est de l'ordre de 92%.
Critères d'attribution	
CA1. Solutions techniques de réduction des émissions de GES Solution 1 : Des points seront attribués aux soumissions proposants un nombre plus élevé d'itinéraires que celui défini par ST1 des critères essentiels. Solution 2 : Des points seront attribués aux soumissions proposants un pourcentage de véhicules plus élevé que celui défini par ST1.	
CA2. Émissions de polluants atmosphériques Des points seront attribués à la soumission proposant un pourcentage de véhicules plus élevé que celui mentionné au ST5.	
CA3. Unités auxiliaires Des points seront attribués en fonction de la proportion de véhicules qui respectent les limites d'émissions de GES exigées.	
CA4. Émissions sonores Des points seront attribués à la soumission proposant une flotte qui respecte la limite des émissions sonores.	
Conditions d'exécution du marché	
Véhicules neufs Si l'un des véhicules doit être remplacé, le nouveau véhicule doit respecter l'ensemble des exigences définies précédemment.	
Optimisation des trajets Les véhicules peuvent être dotés d'un système d'optimisation et de planification des itinéraires qui peuvent réduire la consommation de carburant de 5 % à 15 %. Il est recommandé aux soumissionnaires d'étudier la possibilité de mettre en œuvre ces systèmes d'optimisation dans leurs équipements de collecte des déchets.	

Source : Commission Européenne (2021)

Les critères environnementaux devraient être conçus dans le but d'intensifier la compétitivité des soumissionnaires et faciliter l'accès au marché pour les petites et moyennes entreprises (Pircher, 2019). Toutefois, ces critères pourraient éliminer des soumissionnaires du marché à cause de leur manque de ressources financières et technologiques ou bien stimuler d'autres entreprises à innover en R&D et à investir dans les technologies durables. Les marchés publics verts peuvent ainsi constituer un levier pour l'éco-innovation chez les prestataires de services, qui y voient une opportunité de demeurer compétitifs (Alvarez et Rubicon, 2015; Rainville, 2017).

2.4.2. Les catégories de marchés publics verts

Cette revue de littérature a été menée en suivant une approche systématique selon les directives méthodologiques de Durach et al. (2017). Contrairement aux autres sections, qui visaient principalement à présenter les concepts et les approches existantes, la revue de littérature sur les marchés publics verts avait pour objectif d'identifier de manière exhaustive les mécanismes et modèles proposés dans la littérature afin de soutenir le développement des modèles analytiques présentés dans cette thèse. Une revue systématique s'imposait donc pour assurer une couverture rigoureuse des travaux existants. Cette démarche rigoureuse a été subdivisée en six étapes distinctes. Après la définition de notre problème de recherche et la détermination des caractéristiques requises telles que les définitions, le contexte et les concepts pertinents pour orienter notre recherche, nous avons construit notre échantillon initial d'articles. Des bases de données renommées telles que Science Direct, ABI/Inform, Scopus et Google Scholar ont été explorées. Nous avons inclus une variété de types de données, notamment des conférences, des journaux scientifiques, des rapports de recherche, des livres et des thèses pour la période s'étendant de l'année 2013 à 2025. Grâce à l'utilisation de mots-clés spécifiques "Green public procurement and organizational aspects", "Green public procurement and individual aspects", "Green public procurement and operational aspects" et "EU tendering", nous avons affiné notre recherche. L'outil de gestion de références Mendeley a été utilisé pour organiser les

articles. Dans l'étape cruciale de la sélection des articles les plus pertinents, nous avons établi des critères d'inclusion exigeant que les articles, de langue française ou anglaise, aient fait l'objet d'une évaluation par des pairs. Enfin, nous avons synthétisé la littérature en mettant particulièrement l'accent sur les titres et les résumés.

Cette rigueur méthodologique nous a finalement conduit à une sélection finale de 62 articles qui fournissent une base solide pour notre étude approfondie des MPV. Le Tableau 2.5 résume les articles sur les marchés publics verts en se basant sur la catégorisation de Sönnichsen et Clement (2020).

Tableau 2. 5
Les différentes catégories identifiées dans un marché public vert

Catégories identifiées	**Nombre d'articles**
Aspects organisationnels : taille, stratégies, administrations et politiques	16
Aspects humains : croyances, sensibilisation et encadrement	12
Aspects opérationnels : processus, critères environnementaux et sélection de fournisseurs	34

Source : Construction personnelle

La littérature a montré que la mise en œuvre des MPV dépend des aspects organisationnels tels que la taille de l'organisation, sa stratégie, ses capacités administratives ou encore son environnement politique. Par exemple, les municipalités de plus grande taille ont davantage tendance à adopter une stratégie de MPV. En revanche, une fois la stratégie adoptée, l'intégration des critères verts devient une tâche compliquée à cause des niveaux hiérarchiques, de l'influence du contexte politique, de la complexité et des besoins de coordination interne (Bryngemark et al., 2023). Selon

Johnson et Klassen (2022), une implémentation efficace des MPV dépend de la manière dont l'organisation intègre la durabilité dans sa culture, ses collaborations et ses procédures. En outre, Pokhrel et Awasthi (2025) ont identifié les déterminants qui favorisent ou freinent les MPV, tels que la capacité interne, l'engagement de la haute direction, l'alignement avec les plans stratégiques de durabilité, le leadership politique, la formation des acheteurs, ainsi que la coordination entre services. Le modèle organisationnel façonne ainsi la circulation de l'information entre les parties prenantes et le succès de l'implémentation des MPV (OECD, 2024). Ainsi, les décisions au niveau des autorités publiques sur l'adoption des MPV exercent une influence sur la stratégie, les ressources et la gouvernance des fournisseurs (Wang et al., 2025).

Par ailleurs, les aspects humains tels que les croyances personnelles des acheteurs publics, leur niveau de sensibilisation environnementale et l'encadrement dont ils disposent présentent d'autres déterminants essentiels pour la mise en œuvre des MPV. Revez et al. (2023) ont mené une analyse qualitative des croyances, attitudes et représentations quotidiennes des acheteurs. Ils ont montré que l'intégration de critères verts au niveau des procédures d'achat est influencée par les avis personnelles des acheteurs sur la responsabilité environnementale et leurs interprétations subjectives des MPV. En outre, Ferri et al. (2025) ont examiné le rôle de la sensibilisation environnementale sur l'adoption de pratiques de MPV, montrant que la formation et l'exposition des acheteurs aux enjeux de durabilité renforcent leur intention d'intégrer des critères verts. Ils ont également souligné que plus les procédures des MPV sont perçues comme complexes par les acheteurs, plus il devient difficile d'avoir des intentions d'utiliser des pratiques d'achat durable. Ainsi, la littérature a montré que les aspects humains expliquent l'hésitation de certains acheteurs et l'implication active d'autres envers les critères verts. Cette perspective complète les approches centrées sur les aspects organisationnels du MPV.

En plus des aspects présentés précédemment, la littérature a identifié également des aspects opérationnels, tels que le processus d'achat, les critères environnementaux

mobilisés et les mécanismes de sélection et d'évaluation des fournisseurs, qui jouent un rôle important dans l'adoption des pratiques de MPV. Plusieurs études ont analysé les processus et les outils pour la transition vers les MPV en identifiant les directives générales et les routines administratives. Selon Cheng et al. (2018), les phases des achats publics verts présentent l'ensemble des étapes allant de l'élaboration des politiques, leurs traductions en critères concerts jusqu'à la sélection des fournisseurs, l'attribution des contrats et le suivi. Ce processus est soumis d'un côté à un ensemble d'obstacles comme le manque de traçabilité et l'absence d'outils de mesure, et d'autre côté influencé par des facilitateurs tels que les directives globales, l'analyse du coût du cycle de vie, les outils d'évaluation et les écolabels. Witjes et Lozano (2016) ont souligné l'importance de la collaboration et des spécifications socioculturelles et de la proximité entre les parties prenantes. Par ailleurs, Lăzăroiu et al. (2020) ont montré que le MPV est un outil administratif et stratégique qui oriente les organisations vers la durabilité. Ils ont souligné que l'efficacité des MPV dépend de l'implication des parties prenantes et de la capacité des organisations à intégrer des critères environnementaux dans leurs stratégies et leurs processus d'approvisionnement. Bernal et al. (2019) ont proposé un cadre structuré qui consiste à intégrer efficacement les aspects sociaux dans les appels d'offres. L'étude a également mis en lumière l'importance de créer des outils pour l'ajout des critères, de développer des dispositifs de suivi, former le personnel, assurer une transparence et encourager l'utilisation des technologies au niveau du processus d'appel d'offres. Ahmad Ibrahim et al. (2022) ont souligné que la durabilité exige une intégration de bonnes pratiques vertes et des technologies adaptées à chaque phase du développement. Stuijts et al. (2025) ont montré que les acteurs impliqués comme les chefs de projet et les consultants externes, leurs connaissances, les éléments organisationnels et procéduraux orientent la mise en œuvre des MPV appliqués aux travaux d'infrastructure. Mélon (2020) ont souligné que le cadre juridique européen empêche l'adoption généralisée des MPV à cause de la complexité des directives. Par conséquent, les acheteurs préfèrent la soumission au coût le plus bas au détriment des performances environnementales. Ainsi, une législation plus précise sous forme de cadre simplifié serait nécessaire pour encourager la mise en œuvre des MPV.

Concernant la deuxième sous-catégorie opérationnelle liée aux critères environnementaux, la littérature s'est concentrée généralement aux exigences liées au cycle de vie et aux émissions de GES (Scherz et al., 2023; Stokke et al., 2022). Les chercheurs ont également étudié les facteurs qui influencent l'intégration des critères environnementaux au niveau des marchés publics verts et ont énuméré les problèmes rencontrés par les autorités publiques pour mettre en œuvre les pratiques vertes (Brammer et Walker, 2011; Uttam et Le Lann Roos, 2015; Walker et Brammer, 2009). Selon Halonen (2021), l'intégration des critères environnementaux comme les exigences techniques, les critères d'attribution ou les analyses du cycle de vie est une tâche complexe qui augmente le besoin d'expertise externe et mobilise davantage de ressources administratives. Pour cette raison, l'UE a créé depuis 2008 des critères de MPV communs à certains secteurs (Commission européenne, 2008).

Une branche de la littérature sur les marchés publics verts s'est basée sur une approche qualitative de grande envergure pour analyser les pratiques vertes et leurs efficacités (Cheng et al., 2018). Par exemple, Aldenius et Khan (2017) ont présenté une étude de cas comparative qualitative basée sur des entrevues afin d'analyser le potentiel des marchés publics verts à promouvoir l'introduction de carburants renouvelables au niveau du secteur du transport public suédois. Correia et al. (2013) ont démontré que les autorités devraient accorder plus d'importance à la pratique d'approvisionnement à faible émission de carbone pour parvenir à une meilleure compréhension des outils de gestion du carbone. D'autres études ont également recommandé l'intégration de l'analyse du cycle de vie au niveau des politiques publiques (Diófási-Kovács et Tátrai, 2025; Jegen, 2023). Par conséquent, plusieurs entreprises adoptent aujourd'hui des pratiques et des stratégies de réduction du carbone afin de limiter leurs émissions en GES et de rester compétitifs au niveau des marchés verts (Ali et al., 2021; Lăzăroiu et al., 2020).

D’autres chercheurs ont utilisé des outils quantitatifs pour étudier les MPV. Par exemple, Trovato et al. (2020) ont montré, via une analyse économique et du cycle de vie, que les technologies durables à faibles émissions de GES réduisent la consommation d’énergie. Alvarez et Rubicon (2015) ont calculé la trace carbone de deux années consécutives d’un service de conservation afin de proposer des recommandations pour mettre en œuvre des exigences sur les émissions de carbone. Xu et al. (2016) ont proposé une méthode d’évaluation quantitative qui compare la performance environnementale de plusieurs soumissions pour aider le gouvernement à acheter du matériels informatiques plus écologiques. Les critères d’évaluation des fournisseurs sont basés à la fois sur le niveau de performance environnementale et le prix de la soumission. Prag et al. (2023) ont montré que la réduction des émissions de GES liée à la transformation des menus scolaires vers des options plus durables dépend fortement des bases de données d’analyse de cycle de vie utilisées. En outre, Rietbergen et Blok (2013) ont évalué l’impact d’un système de gestion de la consommation d’énergie et des émissions de GES sur la réduction des émissions à l’échelle nationale aux Pays-Bas. C’est un système de certification par étapes qui donne un avantage concurrentiel lors de l’attribution d’un contrat aux entreprises qui le possèdent. L’étude a été menée au niveau d’un secteur exclut du système d’échange de quotas d’émission de l’UE mais soumis à des objectifs annuels contraignants d'émissions de GES par l’UE. Wang et al. (2024) ont montré que la collaboration entre le secteur public et privé permet de réduire les émissions de GES. Ces partenariats stimulent des changements structurels, technologiques et financiers qui expliquent la baisse des émissions. Lundberg et al. (2015) ont mené une étude empirique au niveau du service de nettoyage suédois afin d’évaluer l’impact des normes environnementales exigées par les autorités publiques sur le comportement des fournisseurs. Les résultats montrent que le comportement de ces derniers à participer à cet appel d’offres est faiblement affecté en présence des normes environnementales explicites. Parikka-Alhola et Nissinen (2012) ont examiné la détermination des critères d’attribution environnementaux au niveau d’un service de transport de marchandises. Une analyse du cycle de vie et la méthode de calcul des coûts environnementaux proposée par l'UE ont été déployées pour

déterminer la soumission économiquement la plus avantageuse. Cerutti et al. (2016) ont mesuré les économies environnementales qui peuvent être réalisées à travers une estimation de la trace carbone d'une chaine logistique alimentaire. Welling et Ryding (2021) ont analysé la distribution de la performance des critères environnementaux issus des analyses de cycle de vie. Ils ont montré que la définition des critères dépend de cette distribution. Orfanidou et al. (2023) ont montré que l'utilisation des outils d'analyse du cycle de vie permet d'évaluer l'impact économique des MPV. Ils ont souligné que l'intégration de critères environnementaux peut être rentable à condition qu'elle s'appuie sur une bonne planification et coordination. Ainsi, les MPV présentent une approche qui fait baisser les émissions et poussent les entreprises à adopter des technologies plus propres, à améliorer leur efficacité énergétique et à innover (IISD, 2024; Tan et al., 2025).

Par la suite, pour la troisième sous-catégorie qui se concentre sur la sélection des fournisseurs, Nongwe et Shatta (2025) ont montré que la sélection de fournisseurs verts améliore la performance sociale, l'efficacité opérationnelle et la qualité du service. Les critères de sélection incluent la certification environnementale, le respect des normes vertes et l'intégration d'exigences de durabilité. Bayındır et Demir (2025) ont démontré que remplacer la sélection traditionnelle des fournisseurs basée sur le plus bas prix soumis par une approche multicritère utilisant la logique floue permet de mieux évaluer les soumissions. En outre, d'autres études ont utilisé la méthode Delphi et ont souligné leurs forces et faiblesses au niveau des MPV (Zaini et al., 2025). Donc, la sélection et le suivi des fournisseurs déterminent l'efficacité des MPV car le respect des critères techniques et légaux conditionne la performance de l'achat public. Le suivi continu des fournisseurs est nécessaire pour détecter les défauts de qualité et les comportements frauduleux entrainant non seulement des inefficiences, mais aussi des sanctions pénales (Achmad et al., 2025).

Dans les marchés publics classiques, l'absence d'intégration de critères verts dans la sélection des fournisseurs peut s'expliquer par le manque de collaboration et de

communication entre les parties prenantes (Ograh et al., 2023, 2025). Également, en plus des contraintes budgétaires, les acheteurs publics manquent de formation sur les outils et de compétences nécessaires en matière d'environnement (Igarashi et al., 2015). Pour pallier ces obstacles, certains outils juridiques permettent à l'acheteur de communiquer avec les fournisseurs tout au long du processus de préparation des soumissions, ce qui permet de réduire les risques grâce à une connaissance préalable des coûts sur l'ensemble du cycle de vie (Uttam et Le Lann Roos, 2015). Ainsi, le succès des MPV repose sur une multitude de critères, des règles et une interaction efficace et structurée avec les fournisseurs dans une logique collaborative (Alhola et al., 2019; Cheng et al., 2018).

L'adoption des MPV dépend ainsi simultanément des aspects organisationnels (taille, stratégies, administrations et politiques), humains (croyances, sensibilisation et encadrement) et opérationnels (processus d'achat, les critères environnementaux mobilisés et les mécanismes de sélection et évaluation des fournisseurs). L'ensemble de ces aspects sont donc complémentaires pour une mise en œuvre efficace des MPV. Dans le cadre de cette thèse, notre recherche est axée sur les aspects opérationnels et le Tableau 2.6 présente un résumé des principales études identifiées.

Tableau 2. 6
Survol d'études sur les aspects opérationnels d'un MPV

Aspect opérationnel	**Références**	**Méthode de recherche**	**Type de données**
Processus	Stuijts et al. (2025)	Étude de cas	Qualitatif
	Ahmad Ibrahim et al. (2022)	Entrevue	Qualitatif
	Aldenius et al. (2022)	Analyse de documents	Qualitatif
	Lăzăroiu et al. (2020)	Revue	Qualitatif

	Mélon (2020)	Analyse de documents	Qualitatif
	Bernal et al. (2019)	Technique Delphi	Qualitatif
	Ahsan et Rahman (2017)	Étude de cas	Quantitatif
	Xu et al. (2016)	Étude de cas	Quantitatif
Critères environnementaux	Diófási-Kovács et Tátrai (2025)	Étude de cas	Qualitatif
	Wang et al. (2024)	Régression empirique	Quantitatif
	Orfanidou et al. (2023)	Analyse du cycle de vie	Quantitatif
	Prag et al. (2023)	Étude de cas	Quantitatif
	Jegen (2023)	Analyse du cycle de vie	Quantitatif
	Stokke et al. (2022)	Étude de cas	Qualitatif
	Ali et al. (2021)	Analyse de données	Quantitatif
	Welling et Ryding (2021)	Analyse du cycle de vie	Quantitatif
	Lindfors et Ammenberg (2021)	Étude de cas	Quantitatif
	Trovato et al. (2020)	Analyse du cycle de vie	Quantitatif
	Aldenius et Khan (2017)	Entrevue	Qualitatif
	Cerutti et al. (2016)	Étude de cas	Mixte
	Alvarez et Rubicon (2015)	Étude de cas	Mixte
	Nongwe et Shatta (2025)	Entrevue	Quantitatif

Sélection de fournisseurs	Bayındır et Demir (2025)	Approche de décision multicritère	Quantitatif
	Zaini et al. (2025)	Technique Delphi et décision multicritère	Quantitatif
	Achmad et al. (2025)	Entrevue	Quantitatif
	Ograh et al. (2025)	Entrevue	Quantitatif
	Igarashi et al. (2015)	Analyse de documents	Mixte

Source : Construction personnelle

A travers ce survol des études scientifiques traitant des MPV, on constate que la pression actuelle exercée au niveau de plusieurs marchés publics a favorisé l'adoption de pratiques vertes par plusieurs entreprises (Ma et al., 2020). Les autorités publiques au Québec peuvent aussi exercer une pression sur les prestataires de service en balayage en exigeant des normes environnementales au niveau des appels d'offres ou à travers la réglementation du marché de balayage par des crédits compensatoires en carbone. Actuellement, le marché public de balayage printanier au Québec fait partie du marché volontaire du carbone (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2013). Une étude menée par Ratoavinarivo (2018) a analysé la structure du marché du carbone québécois entre 1999 et 2015 et a identifié quatre étapes d'évolution. La première période, entre 1999 et 2002, correspond à la mise en place du marché volontaire qui était très peu connu durant cette période. Ainsi, peu d'entreprises ont pris part à ce marché et ceux qui l'ont fait participaient à des projets pilotes. La deuxième période, entre 2003 et 2006, correspond à la croissance du marché volontaire et l'initiation de plusieurs projets de réduction de carbone par les participants qui ont fait référence aux mesures internationales développées dans le cadre du Protocole de Kyoto pour quantifier les émissions de GES. La troisième

période, de 2007 à 2010, représente l'apogée du marché volontaire avec les projets développés durant la période précédente. Toutefois, le nombre de nouveaux projets a diminué ce qui coïncide avec l'échec des négociations à la conférence de Copenhague de 2009 sur le renouvellement du Protocole de Kyoto. Ceci a fait diminuer la confiance des participants envers le marché volontaire. De 2014 à 2015, il y a eu un éclatement du marché volontaire et le gouvernement a instauré le Système québécois de plafonnement et d'échange de droits d'émission (SPEDE), qui est devenu obligatoire. Le SPEDE a vu le jour en 2013 et se positionne en parallèle avec le marché volontaire après la volonté du retrait du Canada du Protocole de Kyoto en 2011. Aujourd'hui, le marché réglementé a pris le relais du marché volontaire et cinq protocoles de mise en place de crédits compensatoires ont été repris du marché volontaire et inclus au SPEDE. Les crédits compensatoires au Québec ont pour objectifs de réduire les coûts de conformité des émetteurs, diminuer les émissions de GES et de favoriser l'investissement dans des projets sobres en carbone (Gouvernement du Québec, 2021).

2.4.3. Impact des marchés publics verts sur l'éco-innovation

La majorité des études sur les MPV se sont concentrées sur trois grands axes, qui sont la règlementation, les obstacles de mise en œuvre et la performance environnementale et économique, alors que la dimension d'éco-innovation reste beaucoup moins étudiée ainsi que les mécanismes opérationnels qui la stimulent (Yang et Morotomi, 2025).

Une large partie de la littérature a analysé les directives européennes et les stratégies de transition verte comme l'OECD afin de comprendre comment les règles encadrent l'intégration des critères verts. Les études ont présenté les critères techniques, de sélection et d'attribution. En outre, de nombreuses études de cas ont montré les obstacles rencontrés par les acheteurs publics comme le manque de compétences, de données, de perception de coûts plus élevés et les risques juridiques. Il existe des limites internes comme la formation, la culture et les procédures et d'autres

externes tels que le manque de standards. Une autre branche de la littérature a mesuré les effets des MPV sur les émissions, l'efficacité énergétique ou les coûts sur le cycle de vie à travers des études quantitatives.

Les études précédentes sur les MPV et l'éco-innovation ont montré que les contrats verts ont un effet positif sur les activités d'innovation des entreprises (Caravella et Crespi, 2021; Czarnitzki et al., 2020; Stojčić, 2021). Par exemple, Krieger et Zipperer (2022) ont montré que les PME qui ont remporté des contrats de MPV ont davantage de chances d'innover dans le futur. Cependant, leur analyse reste centrée sur les gagnants des appels d'offres et n'examine pas en profondeur le processus de sélection des fournisseurs innovants qui se caractérise par les contraintes financières des acheteurs publics et par les coûts élevés associés à l'innovation. Selon Yang et Morotomi (2025), les MPV jouent un rôle essentiel dans la stimulation de l'éco-innovation lorsque le nombre de contrats verts atteint un certain niveau significatif et que les entreprises disposent d'un capital intellectuel important. Les auteurs ont proposé aux autorités publiques de ne pas se limiter aux normes existantes lorsqu'elles identifient les critères environnementaux, d'encourager et payer un surcoût pour les pratiques innovantes. Ils ont indiqué également que, vu la complexité des MPV, les autorités publiques devraient disposer des ressources nécessaires afin de définir des critères mesurables afin d'être aptes à comparer les soumissions sur des dimensions environnementales et économiques. Zheng et Wen (2024) ont constaté que les entreprises qui participent aux appels d'offres des MPV ont une meilleure gestion et performance environnementale. Les auteurs ont suggéré que les autorités publiques sont invitées à améliorer la transparence, de simplifier les procédures administratives et avoir davantage de stabilité contractuelle afin de renforcer les incitations environnementales et d'encourager les PME à adopter des pratiques plus durables. Bryngemark et al. (2023) ont indiqué que les MPV peuvent rendre un fournisseur innovant plus compétitif en se basant sur le pouvoir d'achat des autorités publiques, stimulant ainsi l'éco-innovation. L'OECD (2016) a souligné également que ces pratiques d'achat verts peuvent inciter les autorités publiques à adopter des

comportements plus durables, créant ainsi une demande plus forte pour des solutions vertes. Le processus des appels d'offres peut renforcer la concurrence entre fournisseurs et stimuler l'éco-innovation (Yang et Morotomi, 2025). Rainville (2017) a précisé de son côté que les normes intégrées dans les MPV jouent un rôle déterminant dans le développement de nouvelles solutions innovantes. Morley (2021) a mis en évidence que les stratégies d'achats publics peuvent constituer un levier central dans la transition durable, notamment dans le secteur alimentaire. Deambrogio et al. (2017) a fourni des preuves empiriques montrant que l'achat public de solutions innovantes a un impact positif sur l'efficacité énergétique. Fusillo et al. (2025) ont étudié empiriquement l'impact des MPV sur l'éco-innovation des entreprises américaines. Les auteurs ont montré qu'une augmentation de 10 % des MPV entraîne environ 0,3 % de brevets verts supplémentaires. L'effet est particulièrement marqué pour l'innovation de procédé, car les MPV poussent les entreprises à améliorer leurs méthodes pour répondre à des exigences environnementales plus strictes. Similä et Mwesiumo (2024) ont montré que la cohérence entre les objectifs stratégiques, les mécanismes organisationnels et les ressources disponibles est nécessaire pour que les autorités publiques puissent acheter des innovations vertes. Radicic et Jackson (2025) ont analysé l'efficacité des MPV à favoriser le développement de produits et de procédés verts. Ils ont montré que ces effets sont plus marqués dans les secteurs produisant des biens tangibles, tandis qu'ils apparaissent plus faibles dans les secteurs de services. Sönnichsen et Clement (2020) ont souligné la nécessité d'approfondir les recherches sur les transitions durables, en particulier concernant les effets des innovations sur la performance environnementale et opérationnelle. De même, Han et al. (2024) ont noté que l'absence d'une standardisation claire dans la définition et la pondération des critères environnementaux et le manque de coordination entre les acteurs limitent l'efficacité des MPV en matière de performance environnementale.

Caruana et Vassallo (2024) ont examiné les difficultés auxquelles sont confrontés les gestionnaires d'achats publics, en soulignant le rôle des facteurs culturels et organisationnels dans l'adoption des MPV. Ils ont relevé aussi le manque

de standardisation des critères environnementaux, l'insuffisance de données empiriques et un suivi limité des résultats. Ghisetti (2017) a démontré que les MPV innovants agissent comme un puissant instrument qui favorise l'adoption d'innovations environnementales par les entreprises. L'analyse s'est basée sur des données d'enquêtes menées auprès d'entreprises de l'UE-28, de la Suisse et des États-Unis afin d'estimer l'effet de la participation à des marchés innovants sur l'adoption de technologies vertes. Les auteurs ont souligné aussi l'importance d'intégrer des politiques complémentaires (p.ex., réglementation et soutien à la R&D) pour mieux comprendre les interactions des marchés publics avec l'éco-innovation. Rainville (2022) a démontré que les normes volontaires intégrées dans les appels d'offres améliorent la durabilité des projets urbains. Il a indiqué la nécessité de mener davantage d'études pour comprendre l'évolution des normes au niveau des MPV et de développer des outils de suivi permettant d'évaluer l'innovation. Testa et al. (2011) ont montré que les régulations environnementales ont un effet stimulant sur les investissements innovants et améliorent la compétitivité des firmes de construction dans l'UE. Également, Orsatti et al. (2020) ont montré que les MPV favorisent l'adoption et l'innovation en technologies vertes avec un effet positif amplifié par la composition des compétences locales.

Plus récemment, Lichère (2025) ont proposé une analyse comparative des cadres juridiques et des pratiques de mise en œuvre des MPV dans six pays européens et nord-américains. Les auteurs ont souligné la complexité de l'intégration concrète des critères environnementaux, qu'il s'agisse de leur formulation, de leur pondération ou du contrôle de leur respect. En outre, ils ont précisé que les pénalités pour non-respect des exigences environnementales sont rarement appliquées, car elles sont parfois perçues comme un frein pour les fournisseurs. Certaines administrations privilégient plutôt des mécanismes incitatifs, tels que des marges préférentielles pouvant atteindre 10 % dans certains contextes québécois, ou encore une pondération spécifique des critères environnementaux dans l'évaluation des soumissions, variant généralement entre 5 % et 30 %. Les auteurs ont recommandé enfin de renforcer les outils de mesure

de la performance et d'étudier plus finement les interactions entre les MPV et d'autres politiques publiques, notamment celles liées à l'éco-innovation, à l'inclusion sociale ou à la compétitivité des marchés.

Selon Liu et al. (2021), pour renforcer l'adoption de pratiques de MPV, une mise en place efficace des lois environnementales accompagnée de mécanismes de récompense liés à leur respect est nécessaire. Par ailleurs, les objectifs nationaux en matière de durabilité représentent un autre facteur d'incitation (Lindfors et Ammenberg, 2021). Leal et al. (2020) ont montré que la répétition d'achats courants à faible coût réduit la probabilité que les autorités publiques adoptent des pratiques d'achat vert.

En outre, la mise en œuvre des MPV est étroitement liée aux capacités budgétaires et aux choix stratégiques des autorités publiques. Or, celles-ci privilégient souvent les soumissions les moins coûteuses à court terme, ce qui conduit à écarter des solutions plus vertes. Selon Ahsan et Rahman (2017), les restrictions budgétaires constituent un frein majeur à la mobilisation de ressources nécessaires pour soutenir les initiatives liées aux MPV. Les contraintes financières peuvent ainsi limiter la mise en œuvre des MPV, notamment lorsque les objectifs économiques sont privilégiés au détriment des considérations sociales ou environnementales (Treviño-Lozano et al., 2021).

Les autorités publiques sont principalement financées par l'impôt, ce qui limite la marge pour accepter des surcoûts trop élevés (Halonen, 2021). C'est pour cette raison que la littérature insiste sur la soumission combinant performance environnementale, qualité et coût. Toutefois, selon cet auteur, il n'existe aucune règle, seuil ou directive précise qui indique jusqu'à quel pourcentage de surcoût pour une autorité publique il est considéré comme acceptable pour la sélection d'un fournisseur éco-innovant. Autrement dit, les autorités publiques savent qu'elles doivent payer davantage l'éco-

innovation mais il n'existe pas de critère officiel pour préciser à partir de quel niveau de surcoût on franchit la limite de ce qui est acceptable.

Ainsi, les obstacles majeurs aux MPV résident dans la perception de coûts plus élevés, le manque de standards au niveau des exigences environnementales et l'insuffisance d'outils opérationnels (Sapir et al., 2022).

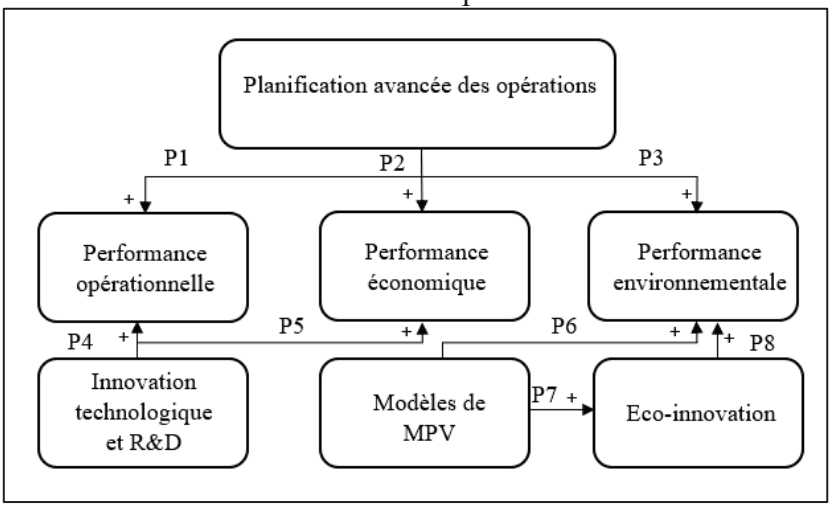
La littérature sur les MPV a recommandé fréquemment aux autorités publiques d'intégrer, dans leurs appels d'offres, des directives générales telles que des normes, des spécifications techniques, des critères de performance environnementale ou des mesures incitatives. Toutefois, elle n'explique pas de manière détaillée comment ces directives peuvent être traduites en modèles analytiques d'évaluation compétitive permettant de mesurer la compétitivité réelle des fournisseurs innovants. Spécifiquement, le surcoût minimum pour l'octroi d'un contrat à un fournisseur éco-innovants par rapport aux fournisseurs-compétiteurs.

La revue de littérature met en évidence trois principales lacunes. Premièrement, les travaux existants sur les problèmes de tournées de véhicules tiennent rarement compte de l'ensemble des contraintes propres aux opérations de balayage printanier. Deuxièmement, les recherches sur les brosses de balayage se concentrent principalement sur leurs performances techniques, sans analyser leurs retombées opérationnelles et économiques. Enfin, bien que les marchés publics verts soient reconnus comme un levier d'éco-innovation, peu d'études proposent des cadres analytiques permettant d'intégrer les critères environnementaux dans l'évaluation des soumissions et d'estimer le surcoût associé à une solution éco-innovante. Ces lacunes justifient le développement du cadre conceptuel présenté dans la section suivante.

2.5. CADRE CONCEPTUEL

Dans cette partie, le cadre conceptuel lié à notre recherche est présenté. Il regroupe l'ensemble des concepts ainsi que les relations entre ces derniers, appelées propositions. Le cadre conceptuel s'articule autour de trois dimensions complémentaires correspondant aux objectifs de la recherche : la planification des opérations, l'innovation technologique et les marchés publics verts. Il met en évidence les relations entre ces dimensions et leurs effets attendus sur les performances opérationnelle, économique et environnementale des opérations de balayage printanier. La Figure 2.5 présente le cadre conceptuel proposé.

Figure 2. 5
Cadre conceptuel

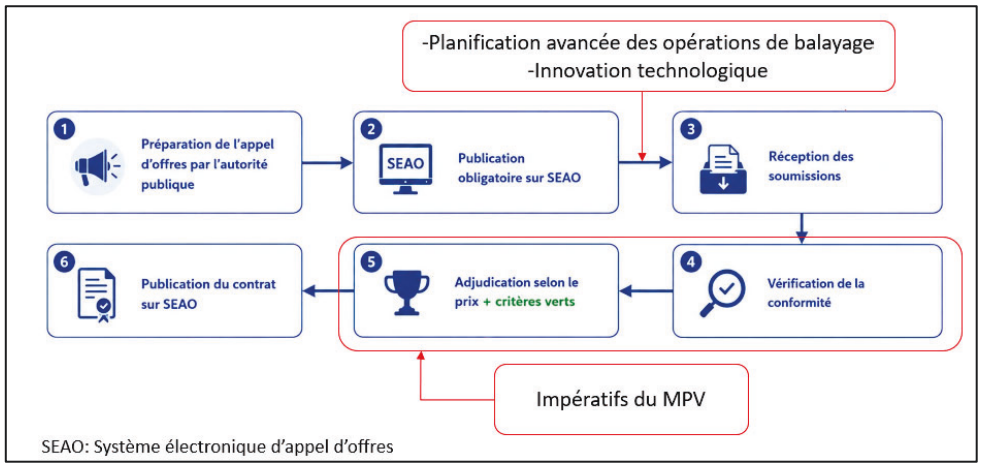


Source : Construction personnelle

Ce cadre conceptuel illustre les relations proposées entre les principaux concepts étudiés dans cette recherche. Il constitue le fondement théorique des trois articles qui composent cette thèse. Premièrement, l'introduction d'une planification avancée des opérations constitue l'élément central, qui agit simultanément sur les trois dimensions clés de performance. La proposition P1 pose que cette planification améliore la performance opérationnelle en réduisant la durée totale des opérations et en optimisant la séquence de balayage. La proposition P2 affirme qu'elle influence

positivement la performance économique, notamment en diminuant le coût total des opérations. La proposition P3 suggère enfin que la planification contribue également à améliorer la performance environnementale, particulièrement lorsque les modèles d'émissions sont intégrés à l'outil de planification. Dans un cadre d'amélioration de l'efficience opérationnelle, l'étude de l'impact de l'augmentation de la vitesse de balayage sur les opérations permet de fournir les outils d'analyse quantitative nécessaires pour aider le prestataire de services à prendre des décisions avisées en R&D en nouvelles brosses. Cette innovation technologique permet d'améliorer la durée (P4) et les coûts opérationnels (P5). La modélisation des MPV et l'intégration de critères environnementaux permettent de valoriser le système novateur qui présente de meilleures performances environnementales (P6). Aussi, les MPV stimulent l'éco-innovation (P7) qui à son tour améliore la performance environnementale (P8). Ainsi, le cadre conceptuel met en évidence les liens entre la planification avancée des opérations, l'innovation technologique et les modèles de marchés publics verts, qui constituent les trois axes complémentaires développés dans cette thèse. La Figure 2.6 présente le processus d'attribution d'un contrat de balayage modifié (en rouge) pour répondre à nos trois questions de recherche.

Figure 2. 6
Processus d'attribution d'un contrat de balayage



Source : Construction personnelle

TROISIÈME CHAPITRE
LE CADRE OPÉRATOIRE

Le troisième chapitre présente la méthodologie de recherche proposée afin d'atteindre notre objectif d'explorer l'impact d'une planification avancée des opérations de balayage printanier sur le processus de soumission d'une offre de prix, fournir les outils d'analyse quantitative nécessaires pour aider le prestataire de services à prendre des décisions avisées en R&D en nouvelles brosses et proposer un cadre de MPV afin d'évaluer le surcoût associé à la performance environnementale du système innovant.

Les sections suivantes identifient la méthodologie du *design science,* en spécifiant et en justifiant la perspective épistémologique adoptée. Le cadre opératoire fourni également les éléments démontrant la rigueur et la pertinence de la méthodologie de recherche et les techniques de collecte et analyse des données.

3.1. LE DESIGN SCIENCE

Le concept de *design science*, également connu sous le nom de science de la conception, a été initialement formulé par Herbert (1969). La *design science* représente une approche méthodologique de recherche visant à élaborer des artefacts concrets et fonctionnels, tels que des systèmes, des modèles ou des méthodes, dans le but de résoudre des problèmes spécifiques (Reinerth et al., 2019).

À la différence d'autres paradigmes de recherche, la *design science* met particulièrement l'accent sur la création de solutions pratiques. Son objectif ultime est de développer des connaissances générales pour résoudre des problèmes concrets sur le terrain (Aken et al., 2016; Aken et Romme, 2009).

En mettant en avant une conception orientée vers l'apprentissage, la *design science* encourage des ajustements continus en fonction de l'évolution des connaissances. Cette méthodologie se révèle particulièrement adaptée aux recherches visant à apporter des contributions à la fois théoriques et pratiques (Van Aken, 2004).

La recherche en Design Science peut être conduite selon différents paradigmes épistémologiques, notamment le positivisme (Crossan, 2003; Gonzalez et Sol, 2012; March et Smith, 1995), l'interprétativisme et le pragmatisme (Goldkuhl, 2012b; Gonzalez et Sol, 2012).

Le positivisme se base sur l'idée que la connaissance peut être obtenue par l'observation objective, la mesure et l'expérimentation (Gonzalez et Sol, 2012). Par conséquent, les chercheurs positivistes utilisent des méthodes quantitatives pour répondre à leurs questions de recherche (Smith, 1998).

L'interprétativisme considère que la réalité est subjective, soulignant que la compréhension dépend des interprétations individuelles (Kroeze, 2011). Les chercheurs interprétativistes se concentrent sur la signification que les individus attribuent à leurs expériences et actions. Ils essayent de comprendre, reconstruire et éviter de déformer les significations attribuées par les participants en les utilisant comme éléments constitutifs dans le processus de construction théorique (Goldkuhl, 2012b). Par conséquent, ils utilisent des méthodes qualitatives comme les entretiens, les observations et la recherche ethnographique.

D'autre part, le pragmatisme est une école de pensé qui s'intéresse aux actions, aux expériences pratiques et leurs conséquences (Hevner, 2007). Il considère que l'objectif principale de la science est la création de connaissances pratiques, orientées vers l'utilité, plutôt que la compréhension absolue de la nature du monde (Goldkuhl, 2012a). Selon cette perspective, la vérité est ce qui fonctionne dans la pratique. Ainsi, la validité d'une idée ou d'une théorie est évaluée en fonction de son efficacité pratique

plutôt que de sa conformité à une réalité absolue (Goldkuhl, 2012b; March et Smith, 1995).

Selon Deng et Ji (2018), les paradigmes du positivisme et de l'interprétatif (constructivisme) ne répondent pas de manière exhaustive aux besoins particuliers de la *design science*, limitant la capacité des chercheurs à proposer des réponses cohérentes aux questions de recherche fondamentale axées sur la création. Gregg et al. (2001) ont proposé qu'il existe une interdépendance intrinsèque des trois paradigmes (positiviste, interprétatif et pragmatique). Purao (2013) met en évidence la nécessité d'une approche dynamique en *design science*, où la fusion entre l'artefact et le problème délimite la perspective épistémologique. Selon Deng et Ji (2018), le pragmatisme pourrait être un paradigme utile pour la *design science*. D'autres chercheurs ont proposé de positionner la *design science* dans un paradigme pragmatique (Cole et al., 2005; Goldkuhl, 2012a, 2012b; Hevner, 2007).

Cette recherche vise à développer plusieurs artefacts d'aide à la décision répondant à des besoins opérationnels réels du secteur du balayage. Plus précisément, elle propose un premier artefact sous la forme d'un outil de planification permettant d'améliorer la préparation des offres par les prestataires de services de balayage. Un deuxième artefact consiste en un cadre d'analyse quantitative permettant d'éclairer les décisions d'investissement, notamment en matière de développement de brosses plus performantes. Enfin, un troisième artefact est constitué d'un cadre analytique regroupant différents modèles de marchés publics verts (MPV), formalisés et paramétrés à partir de la littérature, puis appliqués au cas du service de balayage afin d'analyser leurs dynamiques et d'estimer le surcoût associé à l'octroi d'un contrat à un fournisseur éco-innovant par rapport à ses concurrents.

Compte tenu de l'objectif de développer des artefacts destinés à résoudre un problème concret, cette recherche adopte le paradigme pragmatique et mobilise la Design Science comme approche méthodologique.

La *design science* est adaptée à cette étude, car le produit de cette recherche englobe quatre activités principales : l'identification des besoins du prestataire de services en matière de décisions sur l'offre à soumettre, l'approche pour concevoir des outils de planification avancée, puis le développement d'outils d'analyses quantitatives pour appuyer les décisions de R&D en brosses et finalement la formalisation et la paramétrisation des MPV afin de mettre en évidence leur influence sur le surcoût pour l'octroi d'un contrat à un fournisseur éco-innovant.

Hevner (2007) propose une approche en trois cycles pour la recherche en *design science*. Cette approche en trois cycles vise à assurer que la recherche en *design science* est pertinente, bien conçue et rigoureusement évaluée. Elle met l'accent sur l'interaction avec les parties prenantes, la création d'artefacts fonctionnels et la validation scientifique des solutions proposées. Chaque cycle complète les autres pour garantir la qualité et l'efficacité des résultats de la recherche en *design science*.

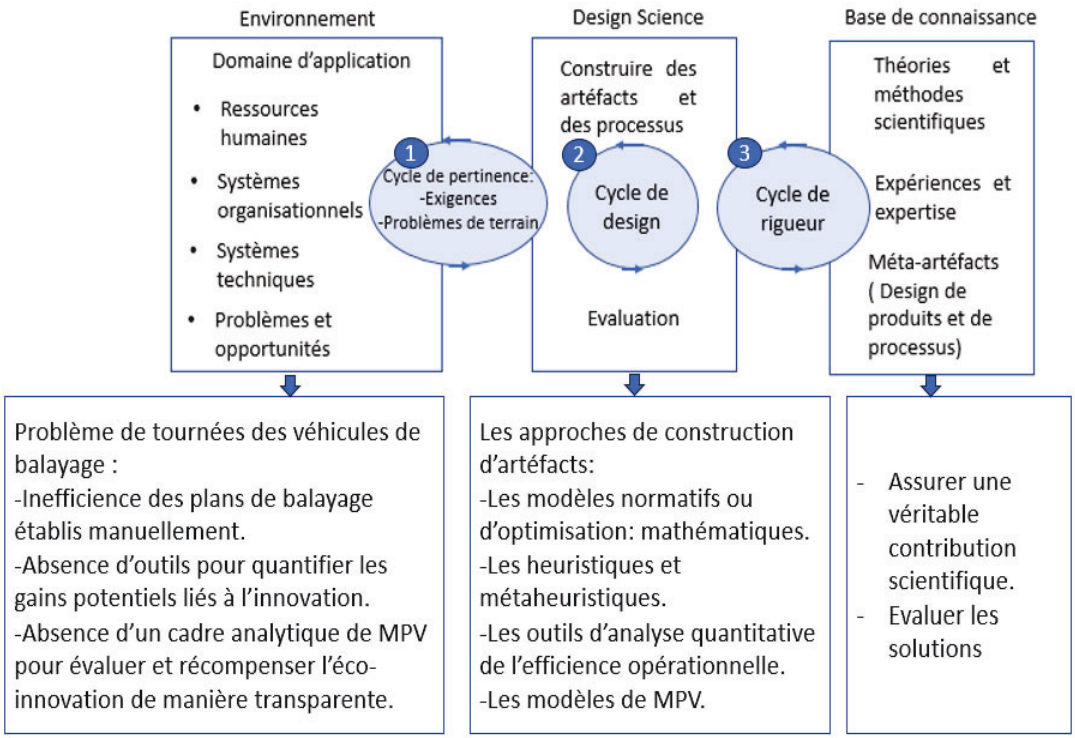
Nous avons appliqué cette approche à notre étude et les 3 cycles illustrés de Hevner (2007) sont détaillés dans la Figure 3.1. Le premier cycle, appelé cycle de la pertinence, met l'accent sur la compréhension des besoins et des problèmes du prestataire de services dans le domaine d'étude, tels que l'inefficience des plans de balayage établis manuellement, l'absence d'outils pour quantifier les gains potentiels liés à l'innovation. Du côté de l'autorité publique, ce cycle met également en évidence l'absence d'un cadre analytique de MPV pour évaluer et estimer le surcoût de l'éco-innovation de manière transparente. Ainsi, le premier cycle vise à identifier les problèmes réels qui nécessitent des solutions et de définir les objectifs de conception pour répondre à ces besoins.

Le deuxième cycle, nommé cycle de *design*, se concentre sur la création de solutions tangibles telles que les modèles mathématiques, les heuristiques, les métaheuristiques, les outils d'analyse quantitative de l'efficience opérationnelle et les

modèles de MPV en suivant des principes de conception. Ces solutions visent à répondre aux objectifs définis dans le premier cycle.

Enfin, le troisième cycle, appelé cycle de rigueur, implique la sélection avisée et l'application appropriée de théories et de méthodes pour construire et évaluer rigoureusement les solutions conçues pour s'assurer de leur efficacité et de leur pertinence.

Figure 3. 1
Les trois cycles de la design science



Source : Adapté de Peffers et al. (2007)

Selon Peffers et al. (2007), la méthodologie du *design science* est un processus qui se réalise en six étapes présentées dans le Tableau 3.1 et appliquées à notre problématique de recherche.

Tableau 3. 1
Les étapes de la recherche en design science

Étapes	Description	Problématique de recherche
Identification du problème	Définir le problème de recherche, identifier les limites par une revue de la littérature et un contact avec le terrain (résidence en entreprise).	-Inefficience opérationnelle de la planification manuelle des opérations de balayage printanier. -Aucun recours aux outils informatiques d'aide à la décision par les gestionnaires. -Absence d'outils pour quantifier les gains potentiels liés à l'innovation. -Absence d'un cadre analytique de MPV pour évaluer et estimer le surcoût de l'éco-innovation de manière transparente.
Motivation et solution		-Améliorer la planification des opérations de balayage avant de soumettre son offre de prix. -Remporter un contrat, réaliser des gains financiers et renforcer la compétitivité du prestataire de services. -Guider des décisions d'investissement en technologies vertes afin de remporter davantage de contrats et améliorer l'efficience opérationnelle. -Estimer les gains potentiels liés à l'innovation en termes de durée et coûts opérationnels basés sur des approches analytiques. -Supporter les analyses économiques subséquentes, telles que l'estimation du retour sur investissement. -Fournir un niveau de GES compétitif dans le cadre d'un marché public vert. -Explorer la dynamique d'évaluation du surcoût associé à l'éco-innovation selon différents modèles de MPV.

Définir les objectifs de la solution	Définir les objectifs à atteindre	-Proposer un nouveau modèle de planification des opérations de balayage conçu spécifiquement pour répondre aux contraintes liées au problème de balayage printanier. -Développer des heuristiques et métaheuristiques en introduisant de nouveaux opérateurs pour répondre aux exigences du problème étudié. -Recours aux outils développés pour estimer les gains opérationnels liés à l'augmentation de la vitesse de balayage. -Proposer des modèles de marché public vert et les simuler pour le cas de balayage afin d'estimer le surcoût de l'innovation.
Conception et développement de l'artefact	La détermination de la fonctionnalité souhaitée de l'artefact et sa création. Démontrer l'utilisation de l'artefact pour résoudre une ou plusieurs instances du problème.	-Développer un MILP, une heuristique et une métaheuristique pour optimiser la planification. -Implémentation des scénarios de vitesse de balayage afin d'analyser l'impact des variations de vitesse sur la performance opérationnelle. -Développer des modèles d'émissions de GES et les intégrer au niveau de l'outil de planification. -Développer des modèles de MPV et les tester pour comparer les deux systèmes de balayage. -Évaluer l'impact de l'éco-innovation dans un marché public vert.
Évaluation	Connaitre les techniques d'évaluation des résultats.	-Tester les modèles/métaheuristiques développés sur des données réelles et fictives. -Tester les scénarios de vitesse de balayage avec l'outil qui minimise la durée et les coûts opérationnels et évaluer les gains. -Tester plusieurs modèles de marché public vert et évaluer le surcoût.
Communication	Connaissance de la culture disciplinaire.	Communiquer les résultats sous forme d'articles scientifiques et les outils développés au partenaire.

Source : Construction personnelle

3.2. APPROCHE DE RAISONNEMENT

Le paradigme de la *design science* et l'épistémologie de recherche pragmatique adoptés ont établi les bases de l'approche de raisonnement de l'abduction et l'induction. Le processus de résolution de problèmes, dans son ensemble, peut fréquemment être assimilé au cadre du raisonnement abductif. Le problème suscite une quête de solutions, et le raisonnement abductif génère des solutions potentielles à ce problème (Schvaneveldt et Cohen, 2010). Selon Peirce, l'abduction est le seul type d'inférence capable de générer des idées novatrices. Également, March (1976) soutenait que l'abduction, qu'il qualifiait de raisonnement productif, constituait le mode de raisonnement central dans la *design science*. L'abduction est utilisée pour générer des idées, des hypothèses ou des solutions potentielles à partir des observations et des données disponibles (Koskela et al., 2018). Ensuite, ces hypothèses sont soumises à des tests, des validations et des ajustements tout au long du processus de recherche.

Dans le cadre de notre étude, nous avons d'abord constaté que le prestataire de services planifie manuellement ses opérations de balayage, entraînant une inefficacité opérationnelle. De plus, le prestataire de service manque d'outils d'analyse afin d'estimer les gains potentiels et prendre des décisions éclairées en matière d'innovation. Enfin, nous avons noté que le système novateur n'est pas récompensé sur sa performance environnementale. Ces observations nous ont amenés à formuler une première hypothèse basée sur le raisonnement par abduction en *design science*, suggérant que l'optimisation des tournées des véhicules à travers la conception de modèles et l'application d'heuristiques et de métaheuristiques pourrait améliorer les effets observés. Après avoir généré des idées par abduction et formulé l'hypothèse, le raisonnement inductif est utilisé pour vérifier empiriquement si le nouveau *design* a conduit à une amélioration. Ce processus nécessite des tests, des validations et des ajustements progressifs, formant ainsi un cycle itératif d'apprentissage et d'amélioration du design.

3.3. STRATÉGIE DE RECHERCHE

Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi de se focaliser sur une PME spécialisée dans les opérations de balayage. Cette PME opère avec deux systèmes de balayage distincts. D'un côté, elle utilise un système classique, similaire à celui employé par d'autres PME du même secteur. De l'autre côté, elle a mis en place un système novateur qui la distingue des autres acteurs du marché, étant la seule à posséder cette technologie avancée. Dans le cadre de cette recherche, ce système est considéré comme une éco-innovation.

Le choix d'une étude de cas unique s'explique par la volonté d'explorer en profondeur les opérations de balayage spécifiques à cette PME. La coexistence de deux systèmes différents offre une opportunité exceptionnelle d'analyser les aspects traditionnels et novateurs des opérations, facilitant ainsi le développement des outils d'optimisation adaptés à ces deux réalités. Cette stratégie s'aligne parfaitement avec la méthodologie de la *design science*, axée sur la création de solutions innovantes répondant aux besoins particuliers des organisations étudiées (Baxter et Jack, 2008). En mettant l'accent sur cette PME avec ses deux systèmes distincts, la recherche vise à apporter une contribution significative à la création d'une solution pratique dans le domaine des opérations de balayage. La recherche vise à développer et évaluer des outils de planification avancée et d'aide à la décision, à analyser leurs impacts sur l'efficience opérationnelle, à soutenir une démarche d'innovation et à proposer des modèles de MPV permettant de déterminer le surcoût à payer par l'autorité en fonction de la performance environnementale de l'éco-innovation.

3.4. COLLECTE ET ANALYSE DE DONNÉES

Dans cette recherche, quatre principales sources de données ont été mobilisées : une revue de la littérature, l'observation en contexte de la résidence et les échanges informels avec le partenaire industriel, l'analyse des appels d'offres ainsi que l'analyse de données opérationnelles. Ces différentes sources ont été utilisées afin de développer

une compréhension approfondie des opérations de balayage printanier, d'identifier les contraintes opérationnelles du problème étudié et de soutenir le développement des artefacts proposés dans cette thèse. Les échanges avec le prestataire ont permis d'accéder à diverses informations opérationnelles, à des données de géolocalisation, à des cartes de secteurs à balayer ainsi qu'à plusieurs documents liés à la préparation et à l'exécution des contrats de balayage.

Dans cette section, nous avons détaillé les différentes étapes cruciales liées à la collecte et à l'analyse de données. De plus, nous avons mis en lumière l'identification des contraintes, un processus essentiel pour comprendre les défis opérationnels spécifiques. Enfin, nous avons présenté notre échantillon des appels d'offres sélectionnés qui a été utilisé dans notre démarche d'amélioration des opérations de balayage.

3.4.1. Observation du contexte opérationnel et échanges avec le partenaire industriel

Une démarche d'observation en contexte réel a été réalisée auprès de l'entreprise Arseno Balayage tout au long du projet de recherche. Cette démarche a été complétée par de nombreux échanges informels avec le directeur des opérations et la gestionnaire des opérations. Ces interactions ont permis de mieux comprendre les pratiques actuelles de planification, les contraintes opérationnelles, les défis associés à l'amélioration des opérations ainsi que les besoins du prestataire en matière d'aide à la décision.

Les observations réalisées, combinées à l'analyse de documents opérationnels et de données fournies par le partenaire industriel, ont permis d'identifier les principales caractéristiques du problème étudié et de guider le développement des modèles proposés dans cette recherche. Afin de présenter les principaux éléments recueillis, les résultats sont regroupés en trois volets : la compréhension des opérations

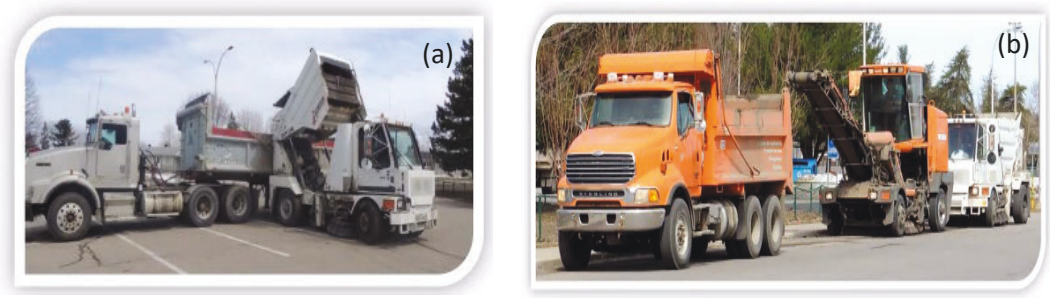
de balayage, la modélisation et les outils d'optimisation, l'innovation et la transition vers les marchés publics verts.

3.4.1.1 Compréhension des opérations de balayage

Le processus de balayage commence par l'analyse des exigences contractuelles. Le prestataire de service examine l'appel d'offres pour identifier les zones à balayer, comprendre les niveaux de service exigés, les contraintes de calendrier, les plages horaires autorisées (jour/nuit) et les exigences environnementales ou de sécurité. La durée et la complexité des opérations de balayage sont déterminées par plusieurs éléments, tels que la taille de la zone à balayer, la densité de la circulation, la quantité de débris à collecter, la nécessité de signalisation spéciale ainsi que les exigences environnementales telles que le contrôle de la poussière. Ensuite, le prestataire de services découpe les zones en tronçons à balayer souvent par ville, quartier ou type de route et prépare des cartes avec les routes à balayer. Une fois cette étape est terminée, les véhicules sont inspectés et préparés, incluant les balais mécaniques, les camions-citernes pour l'eau, les camions bennes et les véhicules de protection avec atténuateurs d'impact.

Le prestataire dispose à la fois d'un système conventionnel (Figure 3.2 (a)), similaire à celui en usage chez ses concurrents, ainsi que d'une technologie innovante à rendement supérieur (Figure 3.2 (b)). Cette dernière, fruit d'une R&D interne, se distingue par sa consommation de carburant réduite par tonne collectée. Il convient de noter que cette avancée technologique est exclusive à l'entreprise. En ce qui concerne le système novateur, la balayeuse est équipée d'un convoyeur qui permet un déchargement continu des débris à l'avant, directement dans un camion-benne. Cela diffère du système conventionnel qui requiert l'arrêt du service et un déplacement pour le déchargement des débris. De plus, il y a l'utilisation de camions-citernes pour l'approvisionnement en eau et de véhicules de protection avec atténuateurs d'impact.

Figure 3. 2
Les systèmes de balayage chez Arseno Balayage



Source : Ben Daya et al. (2024)

Par la suite, les équipes sont informées des itinéraires via les cartes, des horaires et des consignes particulières. Cette phase est cruciale pour éviter les retards et les interruptions sur le terrain.

Une fois sur site, la signalisation nécessaire est mise en place afin d'assurer la sécurité des travailleurs et des usagers. Ensuite, le balayage est effectué selon le plan prévu, en couvrant la chaussée, les trottoirs et les zones adjacentes, tout en respectant les contraintes de circulation et les vitesses opérationnelles choisies.

Après le balayage, la collecte et la gestion des résidus sont effectuées. Les gros débris sont collectés et transportés vers les sites de disposition ou de traitement appropriés, en conformité avec les exigences environnementales.

3.4.1.2 Modélisation et outils d'optimisation

- Identification des expériences passées du prestataire en matière d'utilisation d'outils ou de logiciels pour optimiser les opérations de balayage

Nous avons observé que le prestataire a équipé sa flotte d'un logiciel de suivi des opérations de balayage. Cet outil permet de détecter à temps réel les travaux. Il s'est également montré ouvert à explorer des solutions d'optimisation des itinéraires.

- Identification des principales difficultés ou inefficacités que le prestataire rencontre dans ses opérations de balayage actuelles

Nous avons constaté que le prestataire a rencontré des défis liés à la gestion des itinéraires et à l'assignation des véhicules en fonction des spécificités de chaque contrat, notamment le balayage nocturne des autoroutes. Il note également la difficulté de faire des ajustements à temps en cas des imprévus.

- Stratégie d'implémentation des outils d'optimisation dans les opérations de balayage

Selon nos observations, le prestataire se montre ouvert à l'implémentation d'outils d'optimisation. Ces outils pourraient l'aider à planifier de manière plus efficace les itinéraires, à allouer les ressources et à gérer les priorités. Par conséquent, il serait capable de minimiser ses coûts opérationnels et soumettre un prix compétitif.

- Exigences de fonctionnalités pour les outils d'optimisation

D'après nos constatations, le prestataire exprime le souhait que les outils d'optimisation intègrent la possibilité de gérer les contraintes spécifiques des contrats et qu'ils offrent des fonctionnalités pour évaluer la performance de ses opérations.

- Mesures de succès pour l'implémentation d'outils d'optimisation

Selon nos observations, les principales mesures de succès pour le prestataire seraient de remporter un contrat de balayage, d'améliorer l'efficacité opérationnelle, d'optimiser l'allocation des ressources et de réduire les coûts.

3.4.1.3 Innovation et transition vers les marchés publics verts

Le prestataire de services a souligné son intérêt à continuer d'améliorer ses opérations de balayage, tant sur le plan opérationnel que stratégique, notamment lors de la préparation des offres à soumettre. Il a exprimé ses besoins à explorer l'idée à innover en brosses plus performantes adéquates au système novateur et à déterminer les gains potentiels en durée d'exécution et en coûts opérationnels. Il a indiqué le manque d'outils et de données d'analyse quantitative permettant d'estimer, de projeter et de comparer ces gains potentiels de manière rigoureuse. La capacité à évaluer ex ante les impacts sur la durée des opérations, le nombre de quarts requis et les coûts totaux apparaît comme un levier central pour appuyer la prise de décision en matière d'investissement en innovation technologique dans les opérations de balayage.

Les échanges avec le partenaire ont également mis en évidence l'importance croissante des considérations environnementales dans les marchés publics. Dans cette perspective, le prestataire a souligné la nécessité de disposer d'outils permettant de démontrer et de valoriser les performances environnementales de ses innovations dans le cadre des appels d'offres.

Enfin, le besoin d'un cadre analytique permettant de comparer objectivement des solutions conventionnelles et innovantes a été identifié. Un tel cadre contribuerait à estimer le surcoût associé à une meilleure performance environnementale et à soutenir la participation du prestataire à une éventuelle transition vers les marchés publics verts.

3.4.2. Collecte et analyse des appels d'offres

L'étape suivante consiste à collecter et analyser les appels d'offres préparés par les autorités publiques, notamment les municipalités et le Ministère des Transports du Québec (MTQ). Ces appels d'offres ont été collectés directement auprès du prestataire

de service. L’étape d’analyse requiert une lecture attentive et systématique de la documentation associée à ces appels d'offres.

L'objectif est de comprendre de manière approfondie les exigences, les spécifications et les contraintes qui encadrent les opérations de balayage. Cette analyse méticuleuse permet d'extraire les informations essentielles suivantes qui serviront de base pour la planification des opérations.

- Description des travaux

Les travaux impliquent un nettoyage approfondi des chaussées, des accotements et des musoirs pour éliminer les débris non adhérents. En plus du balayage, le prestataire est responsable de la collecte des gros débris inaccessibles au balai automoteur.

- Kilométrage à balayer

Cette mesure indique la longueur totale, exprimée en kilomètres, des voies qui requièrent un balayage. Les opérations de balayage impliquent le nettoyage et le balayage des sections urbaines, à savoir les voies de circulation, les élargissements et les intersections. De plus, elles englobent le nettoyage et le balayage des chaussées des ponts, viaducs, contours d'îlots et musoirs. Ces travaux comprennent également l'enlèvement de débris et le balayage à la fois sur la chaussée et les accotements.

- Matériel

Nombre de véhicules et camions : Le nombre de véhicules et de camions nécessaires pour accomplir les travaux peut varier en fonction des différents types de segments à balayer. Le prestataire de services fait appel à une gamme de véhicules comprenant des véhicules de protection équipés d'atténuateurs d'impact, des balais mécaniques, des camions bennes ainsi que des camions-citernes.

Balais mécaniques : Les balais utilisés doivent être de type mécanique et automoteurs. Ils doivent être équipés de deux brosses pour les caniveaux, une brosse ramasseuse, un mécanisme de collecte par convoyeur, une benne et un panier extérieur pour récupérer les éléments non ramassés par le balai.

- Équipement de signalisation obligatoire

Le prestataire de services est tenu de fournir et d'installer l'ensemble de l'équipement de signalisation nécessaire sur le véhicule équipé d'un atténuateur pour la réalisation des travaux. Cela inclut une flèche de signalisation lumineuse et clignotante, ainsi qu'un feu de signalisation de travaux de type gyrophare. Il est également responsable de tous les dommages ou accidents qui pourraient survenir en raison d'une défectuosité ou d'une insuffisance de signalisation.

- Approvisionnement en eau

En complément du processus de balayage, il est essentiel de maintenir un niveau de poussière maîtrisé pour garantir la visibilité, la sécurité publique et prévenir toute forme de pollution. Pour ce faire, les camions-citernes, chargés de cette tâche, doivent être approvisionnés en eau afin de contrôler la dispersion de la poussière générée par le balayage.

- Élimination des débris et résidus

Une gestion adéquate des débris et résidus, conformément aux lois environnementales est exigée. Cela implique leur enfouissement technique dans des sites approuvés.

- Traitement des débris et résidus

Les résidus issus des opérations de balayage, étant catégorisés comme des matières résiduelles, doivent être enfouis ou réutilisés, à condition qu'ils ne présentent

aucun danger. Le prestataire de services est responsable de se renseigner et de prendre les mesures nécessaires pour les faire analyser et déterminer leur admissibilité à un site d'enfouissement technique.

- Suivi des travaux

Le prestataire est tenu de maintenir un journal de chantier exhaustif qui consigne de manière détaillée l'ensemble des travaux accomplis. Ce document joue un rôle essentiel en tant que registre officiel des opérations effectuées sur le chantier.

- Mode de paiement

Les travaux sont rémunérés en fonction du kilométrage, englobant le nettoyage, le balayage, la signalisation, l'élimination des débris et des résidus, ainsi que toutes les dépenses incidentes.

- Acceptation des travaux

Des inspections post-travaux seront effectuées pour s'assurer de la qualité de l'exécution. En cas de résidus, des travaux correctifs seront nécessaires aux frais du prestataire. Ces spécifications détaillées démontrent l'importance accordée à la qualité et à la sécurité dans l'exécution de ces travaux de nettoyage des chaussées. Le respect des exigences légales et environnementales est également une préoccupation centrale dans cet appel d'offres.

3.4.3. Identification des contraintes

L'identification des contraintes constitue une étape cruciale dans le processus d'optimisation des opérations de balayage. À la suite d'une analyse approfondie des appels d'offres ainsi que des entrevues semi-structurées avec le prestataire de services, plusieurs contraintes ont été déterminées. Ces éléments déterminants vont guider la

planification et l'exécution des opérations de balayage, assurant ainsi leur alignement avec les exigences spécifiques énoncées.

Les contraintes relevées sont les suivantes :

- Chaque tronçon doit être balayé une seule fois;
- Une fois le balayage d'un tronçon débuté, il doit être complété avant de commencer le balayage d'un autre tronçon;
- Chaque tronçon de type autoroute doit être balayé pendant un quart de nuit;
- Un quart de travail ne peut pas durer plus que 12 heures;
- Chaque quart de travail doit commencer à un dépôt et se terminer à un dépôt, le dépôt de début n'étant pas nécessairement le même que le dépôt de fin;
- Un quart de travail ne peut pas débuter à un dépôt autre que le dépôt de fin du quart de travail précédent.

3.4.4. Construction de l'échantillon des appels d'offres

Le choix des appels d'offres, en l'occurrence les contrats associés aux municipalités de Nicolet et Victoriaville, revêt une importance cruciale dans le cadre de cette recherche. Ces contrats fournissent une base concrète pour l'application des analyses et des modélisations ultérieures. Choisir des données concrètes permet de prendre en compte les particularités et les spécificités propres à chaque situation, ce qui renforce la pertinence des résultats obtenus. Ces données seront par la suite traitées et caractérisées à l'aide des outils développés dans cette thèse.

Les hypothèses formulées jouent un rôle essentiel dans le processus de modélisation et d'optimisation. Elles définissent les paramètres initiaux qui sont nécessaires pour effectuer les calculs ultérieurs. Ces hypothèses fournissent des points de départ cruciaux et une base solide pour les différentes phases de l'analyse. En établissant des hypothèses claires et bien définies, nous sommes en mesure de cerner

les paramètres clés à prendre en considération et d'assurer la cohérence et la fiabilité des résultats obtenus dans le cadre de cette étude.

Les deux hypothèses suivantes sont formulées :

- La nature du premier quart de travail est connue (il s'agit d'un quart de jour);
- La capacité de la flotte des camions, assurant le transport des balayures aux sites d'entreposage, est suffisante afin de ne pas retarder les opérations de balayage. Ainsi, le transport des balayures pour le déchargement et l'approvisionnement en eau ne sont pas à intégrer dans le problème de planification.

3.5. TRAITEMENT DES DONNÉES COLLECTÉES

Dans cette section, nous aborderons le processus essentiel de traitement des données collectées. Cela comprendra d'abord la préparation des bases de données, en créant des instances réelles. Ensuite, nous nous pencherons sur le traitement des données historiques de géolocalisation, une étape cruciale pour l'analyse approfondie des opérations de balayage.

3.5.1. Préparation des bases de données

Cette étape consiste en l'extraction et la conversion des adresses générales des arcs requises en données exploitables pour l'optimisation. À cet effet, un processus en plusieurs étapes a été déployé. Initialement, les adresses fournies ont été traitées afin d'extraire les coordonnées géographiques précises (x, y) grâce à l'utilisation de la plateforme Google Maps. Cela a garanti une représentation exacte des emplacements en termes spatiaux. En parallèle, un code VBA (Visual Basic for Applications) a été développé pour agir comme un intermédiaire entre Excel et l'API Google Maps. Ce code, couplé à une clé API, a permis à Excel d'envoyer des requêtes à l'API et de récupérer des informations, telles que les distances et les temps de déplacement entre les nœuds. Les données ainsi obtenues ont été intégrées dans une feuille de calcul

Excel, créant ainsi un ensemble de données qui sert de base solide pour les étapes ultérieures d'optimisation et d'analyse (Figure 3.3).

Cette méthodologie a permis de transformer des informations initialement générales en un ensemble de données précises et utilisables, constituant ainsi un fondement essentiel pour la modélisation et l'optimisation subséquentes des opérations de balayage.

Figure 3. 3
Générateur des distances

1	**DepartAddress**	Distance/Time	
2	1164-1208 Avenue Vallée, Plessisville, QC G6L 3E7		
3	**DestinationAddress**	**Distance(m)**	**TravelTime (minutes)**
4	1164-1208 Avenue Vallée, Plessisville, QC G6L 3E7	36943	27,95
5	1160 Avenue Saint-Louis, Plessisville, QC G6L 2M3	36535	27,35
6	QC-165, Plessisville, QC G6L 5S1	35949	26,28
7	574 Rue Saint Calixte, Plessisville, QC	34575,00	25,15
8	305 QC-116, Plessisville, QC G6L 2Y2	34058,00	24,60
9	46.23238669088525, -71.76515595349174	38 652	29,45
10	46.23117697106769, -71.76352517051723	38468,00	29,22
11	46.23125180817783, -71.76534818232709	38656,00	29,57
12	46.23226114542441, -71.76355646682218	38638,00	29,50
13	46.23178385040658, -71.76432350091945	38558,00	29,33
14	520 Avenue Saint-Louis, Plessisville, QC G6L 2M1	37433,00	28,48

Source : Construction personnelle

3.5.2. Traitement des données historiques de géolocalisation

La phase de traitement des données de géolocalisation s'appuie sur une approche méticuleuse et rigoureuse, exploitant l'ensemble exhaustif d'informations extraites du système de suivi GPS intégré aux équipements de balayage d'Arseno Balayage. Ces données, représentant un historique complet des opérations de balayage, ont fait l'objet d'un processus de traitement détaillé visant à en extraire les informations les plus pertinentes. Le traitement a débuté par le suivi précis des trajets empruntés par la flotte d'équipements, combiné à l'enregistrement des vitesses à chaque point

géographique. Cette démarche a permis de catégoriser les opérations en trois états distincts, chacun apportant une compréhension spécifique du processus de balayage. Premièrement, l'état d'attente correspond aux périodes où les équipements demeurent en position d'attente, prêts à être mobilisés pour l'opération de balayage.

Deuxièmement, l'état de balayage identifie les phases effectives de balayage des tronçons routiers. Troisièmement, l'état de déplacement englobe les moments où les équipements sont en mouvement entre les différents points d'intervention. Cette classification détaillée permet une appréhension précise du déroulement des opérations de balayage. Elle offre une vision granulaire, mettant en lumière les moments de productivité optimale, les périodes d'attente potentielles, ainsi que les déplacements entre les différentes zones de travail. Ces données sont cruciales pour les phases subséquentes de comparaison avec les résultats de l'optimisation, ainsi que pour obtenir une vue d'ensemble précise de la réalité des opérations de balayage. L'ensemble de cette phase contribue ainsi à l'élaboration d'une stratégie de planification des opérations de balayage, informée par une compréhension approfondie des réalités opérationnelles.

Cette classification selon l'état est indispensable pour l'étape suivante qui consiste d'une part à regrouper et agréger les points présentant une légère différence de distance et d'autre part minimiser la taille des données. Ensuite, une correction des états a été effectuée pour avoir finalement le répertoire des opérations de balayage exécutées par Arseno Balayage.

3.6. CRITÈRES D'ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DE RECHERCHE

3.8.4. Généralisabilité

La généralisabilité se réfère à la mesure dans laquelle les résultats de la recherche peuvent être étendus à d'autres contextes, à un groupe plus large de personnes ou à des situations différentes (Mark et al., 2009). Dans la recherche en *design science*, l'évaluation des artefacts se concentre sur leur applicabilité et leur généralisabilité, tout

en étant orientée par le critère d'utilité (Deng et Ji, 2018). Cela implique l'examen des artefacts créés dans le cadre de la *design science* pour évaluer dans quelle mesure ils peuvent être appliqués et généralisés, en accordant une attention particulière à leur utilité.

Dans le cadre de notre recherche et à partir de la stratégie d'étude de cas unique (le prestataire de service), les artefacts conçus peuvent être utilisés par d'autres prestataires de service en balayage. Également, en changeant les paramètres et en modifiant ou ajoutant les contraintes nécessaires, les artefacts peuvent être appliqués dans d'autres problèmes de tournées de véhicules (problèmes de routage sur les arcs seulement).

3.6.2. Validité

La validité fait référence à l'exactitude des résultats de la recherche (Liu et Shi, 2015; Yin, 2009). Cela implique que la validité mesure à quel point les résultats d'une étude sont exacts et représentent fidèlement la réalité. En d'autres termes, elle évalue la qualité et la justesse des conclusions tirées à partir des données recueillies. Dans une perspective pragmatiste, la validité repose également sur l'utilité des connaissances produites et sur leur capacité à soutenir efficacement la prise de décision dans un contexte réel (Deng et Ji, 2018).

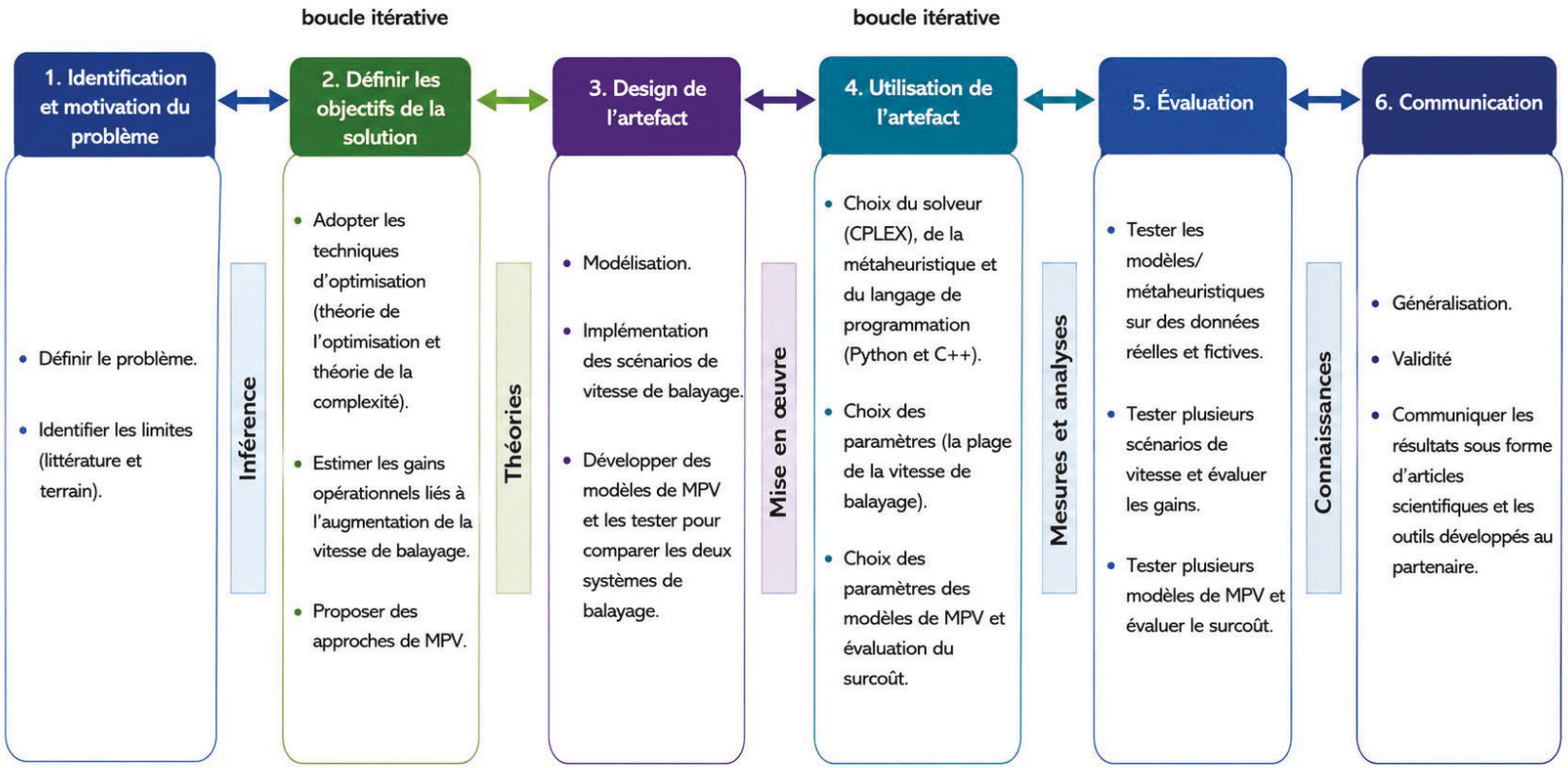
Dans le cadre de cette recherche, la validité repose sur plusieurs éléments complémentaires. Premièrement, les modèles développés ont été construits à partir d'une compréhension approfondie du contexte opérationnel obtenue grâce à l'observation des opérations de balayage, à l'analyse des appels d'offres, des données opérationnelles et aux échanges réalisés avec le partenaire industriel. Deuxièmement, les artefacts proposés ont été évalués à l'aide d'expérimentations numériques réalisées sur des instances représentatives du problème étudié, incluant deux instances réelles fournies par le partenaire industriel. Cette démarche a permis d'évaluer la capacité des artefacts à résoudre le problème étudié et à mesurer leurs performances dans des

conditions proches de la réalité opérationnelle. Enfin, les résultats obtenus ont été présentés et discutés avec le partenaire industriel afin de recueillir une rétroaction sur leur pertinence au regard des besoins opérationnels identifiés.

Ainsi, la validité de cette recherche ne repose pas uniquement sur l'utilité pratique des artefacts développés, mais également sur leur ancrage dans un contexte réel, leur évaluation systématique à partir de données représentatives et leur cohérence avec les besoins exprimés par le partenaire industriel.

Pour résumer, ce cadre opératoire, qui repose sur une démarche itérative en six étapes, allant de la définition du problème à l'évaluation et à la communication des résultats, est présenté à la Figure 3.4. Il combine le développement et l'utilisation de modèles de planification, de GES et de MPV pour analyser différents scénarios et en mesurer les impacts. Cette démarche s'appuie sur une logique d'induction et d'abduction pour ajuster progressivement les modèles à partir des résultats, ainsi que sur la théorie de l'optimisation et de la complexité pour structurer la modélisation et justifier le recours à des méthodes heuristiques adaptées.

Figure 3. 4
Cadre opératoire



Source : Construction personnelle

3.7. LA MÉTHODE DE RÉSOLUTION DU PROBLÉME DE TOURNÉES DE VÉHICULES DE BALAYAGE

3.7.1. Modélisation mathématique

Le MDARPFED avec différents types d'arcs est défini sur un graphe orienté $G = (V, A)$, où $V = \{1, \ldots n, n + 1, \ldots, n + m\}$ est l'ensemble des sommets, $A = \{(i, j) \mid i, j \in V;\ i \neq j\}$ est l'ensemble des arcs. $D = \{n + 1, \ldots, n + m\}$ correspond à l'ensemble des dépôts. $Q = \{1, \ldots, c\}$ est l'ensemble des quarts de travail où $q \in Q$ et c est le nombre maximum de quarts, et nous supposons que le premier quart (q = 1) est un quart de jour. La durée de chaque quart ne doit pas dépasser la durée maximale T = 12 heures. Nous définissons par Qp l'ensemble des quarts de nuit où $Qp = \{2p;\ p \in N*\}$. $K = \{0, \ldots, e\}$ est l'ensemble des positions d'arc où $k \in K$ et e est le nombre maximum d'arcs dans chaque quart. H est l'ensemble des arcs autoroutiers qui nécessitent un service une seule fois pendant un quart de nuit. R est l'ensemble des arcs restants qui doivent être desservis une fois dans n'importe quel quart. On associe à chaque arc $(i, j) \in A$ deux valeurs S_{ij} et t_{ij} qui présentent respectivement le temps de service et de déplacement. Nous définissons un grand nombre $M1$ = 100 et M = 2.

Nous définissons les variables de décision suivantes :

$X_{ijq}^{k} =$ {1 si l'arc (i, j) est traversé sans être servi dans le quart q à la position k; 0, sinon}

$Y_{ijq}^{k} =$ {1 si l'arc (i, j) est servi dans le quart q à la position k; 0, sinon}

$w_q =$ {1 si le quart q existe; 0, sinon}

U_{ij}^{k} est le temps de début de service ou de déplacement sans service de l'arc (i, j) dans le quart q à la position k.

f_q est le temps de fin de service ou de déplacement dans le quart q.

Le modèle mathématique du MDARPFED avec différents types d'arcs est formulé comme un programme linéaire en nombres entiers mixtes (MILP). La formulation mathématique complète du modèle est présentée dans le premier article.

La mise en œuvre du modèle avec l'API Python de CPLEX, intégrée dans *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio*, a constitué une première étape cruciale. Cependant, lors des tests sur des instances réelles, aucune solution optimale n'a été obtenue. Cette situation n'est pas inhabituelle, car la programmation linéaire en nombres entiers peut être limitée lorsqu'il y a un grand nombre de nœuds à prendre en compte, dépassant ainsi une certaine limite, souvent observée aux alentours de 50 nœuds selon les travaux de Oppen et Løkketangen (2006).

La complexité du MDVRP, qui relève de la catégorie NP-difficile, est bien connue dans la littérature. De plus, le caractère combinatoire inhérent au problème complique davantage la recherche de solutions avec des données réelles, notamment dans le cas du contrat de Victoriaville qui comporte 197 nœuds. Face à ce constat, l'attention s'est tournée vers le développement d'une métaheuristique spécifique, nommée RAGV. Cette approche offre une alternative prometteuse pour traiter des problèmes de grande envergure comme le MDVRP. En exploitant des mécanismes d'optimisation heuristique, la métaheuristique RAGV vise à fournir des solutions acceptables, voire optimales, même dans des environnements complexes et exigeants. Cette nouvelle orientation de recherche représente une avancée significative dans la quête de solutions pratiques et efficaces pour le problème du MDVRP dans des contextes réels et ambitieux.

3.7.2. Description de la métaheuristique

Dans la première phase, nous avons élaboré une heuristique visant à construire une solution initiale, notée s. Ensuite, dans la deuxième phase, cette solution sera optimisée grâce à l'application de la métaheuristique RAGV, telle qu'introduite dans la

section 3.2. Nous avons adapté la métaheuristique RAGV développée par Ropke et Pisinger (2006), en y apportant des ajustements spécifiques pour résoudre efficacement la nouvelle variante MDARPFED.

Cette métaheuristique prend la solution s générée lors de la phase constructive comme entrée, puis applique une série d'opérateurs pour l'améliorer. La RAGV est répétée jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint, générant ainsi la meilleure solution trouvée au cours de la recherche. Le pseudo code de la métaheuristique RAGV est présenté ci-après. Contrairement à d'autres métaheuristiques de RAGV, cet algorithme contient une fonctionnalité qui revient à la meilleure solution obtenue jusqu'à présent si un nombre spécifique d'itérations se déroule sans aucune amélioration comme dans l'étude de Sacramento et al. (2019). La formulation complète de la métaheuristique est présentée dans le premier article.

La recherche est divisée en un certain nombre de segments de I itérations et les poids seront réinitialisés au début de chaque segment en fonction de la performance passée de chaque opérateur. Nous définissons par s^* la variable présentant la meilleure solution trouvée pendant la recherche, s la solution courante et s' une solution temporaire générée à partir de s. L'heuristique sélectionne un opérateur en se basant sur son poids actuel. Après qu'une solution temporaire s' a été générée de s, cette nouvelle solution sera évaluée pour pouvoir soit l'accepter ou la rejeter. Nous nous sommes basés sur l'heuristique de SA (présenté dans le Tableau 3.2) pour évaluer la solution temporaire générée comme dans l'article de Ropke et Pisinger (2006). La nouvelle solution s' est toujours acceptée si $Z(s') < Z(s)$, c'est-à-dire, le temps de fin de service de la nouvelle solution est inférieur à celui de la meilleure solution courante. La nouvelle solution s' peut aussi être acceptée avec une probabilité de $Exp\ (-\Delta Z\ /T)$ si $Z(s') > Z(s)$ avec $\Delta Z = Z\ (s') - Z(s)$. À la fin de chaque segment, le poids de chaque opérateur sera mis à jour et la température sera mise à jour selon l'équation $T \leftarrow c * T$ avec $0 < c < 1$. Après un certain nombre maximal d'itérations, la métaheuristique retourne la meilleure solution $s*$.

Avant d'insérer un arc dans n'importe quel quart, certaines conditions doivent être respectées pour l'ensemble des opérateurs développés. Si l'arc enlevé est de type H, c'est-à-dire qu'il ne peut être balayé que pendant un quart nocturne, alors il ne peut être inséré que dans un autre quart nocturne. Pour les arcs de type R, ils peuvent être insérés dans n'importe quels quarts. Pour avoir de meilleurs résultats, à la fin de chaque itération durant laquelle un opérateur a été sélectionné et appliqué, le dernier quart sera supprimé s'il ne contient plus d'arcs à balayer. De plus, après chaque itération, les déplacements non productifs entre les arcs à balayer seront supprimés de la solution temporaire générée afin de minimiser encore le temps de fin de service.

3.7.2.1. L'acceptation d'une solution

La méthode d'acceptation d'une solution indique si la recherche va se poursuivre avec l'ancienne solution s ou la solution temporaire générée s'. Le point en commun entre les différentes méthodes d'acceptation, est l'acceptation d'une solution meilleure que l'ancienne. La différence réside au niveau de l'acceptation d'une solution non améliorée par rapport à l'ancienne comme présenté au niveau du Tableau 3.2 suivant.

Tableau 3. 2
Méthodes d'acceptation d'une solution

Méthode	**Description**
Random Walk (RW)	Chaque nouvelle solution s' est acceptée.
Greedy Acceptance (GRE)	La solution s' n'est acceptée que si elle est meilleure que s.
Simulated Annealing (SA)	On accepte les solutions améliorées par rapport à s. Aussi, si une solution s' n'est pas améliorée, on l'accepte avec une probabilité exp $(\frac{Z(s)-Z(s')}{T})$ avec T est la température qui diminue à chaque itération à travers un paramètre c.
Threshold Accepting (TA)	La solution s' est acceptée si $Z(s') - Z(s) < T$.

Great Deluge Algorithm (GDA)	La solution s' est acceptée si $Z(s') < L$ avec L est le niveau qui diminue à chaque itération à travers un paramètre c seulement lorsqu'une solution a été acceptée.

Source : Adapté de Ropke et Pisinger (2006)

Pour résoudre notre problème, nous avons choisi la méthode d'acceptation de SA grâce à son succès de générer de bons résultats par rapport aux autres méthodes (roman, 2014) tel que proposé par Ropke et Pisinger (2006) (pour le SA, voir (Černý, 1985) and (Kirkpatrick et al., 1983)). Un paramètre de température T est utilisé pour contrôler la probabilité d'acceptation. Dans nos tests numériques, la température initiale T_0 a été définie à $1.05 \text{ x } Z(s_0)$, où s_0 est la solution initiale, et elle est réduite après chaque itération selon la formule $T \leftarrow c * T$, où $0 < c < 1$ représente le taux de refroidissement, fixé à 0.99975 comme suggéré par Ropke et Pisinger (2006).

3.7.2.2. Le mécanisme adaptatif

La métaheuristique applique un opérateur i à chaque itération sur la solution courante. Initialement, tous les opérateurs ont la même probabilité d'être choisis. Ensuite, les poids associés à chaque opérateur sont itérativement ajustés en fonction d'un facteur de réaction γ compris entre 0 et 1, ainsi que du score π_i de chaque opérateur i, comme suggéré dans l'étude de Ropke et Pisinger (2006). Pour un ensemble de p opérateurs, on associe à chacun un poids w_i , $\text{i} = 1, \ldots, \text{p}$. Un opérateur j est sélectionné avec une probabilité $w_j / \sum_{i=1}^{p} w_i$, $\text{j} = 1, \ldots, \text{p}$. Les poids sont recalculés après un certain nombre I d'itérations consécutives. Ces poids sont utilisés pour déterminer la probabilité de sélection de chaque opérateur à chaque itération. Ainsi, les opérateurs les plus performants ont une probabilité plus élevée d'être choisis. Les poids au début de chaque segment seg sont calculés comme suit : $w_i^{seg} = (1-\gamma) * w_i^{seg-1} + \gamma * \pi_i^{seg-1}$, où π_i^{seg-1} est le score de l'opérateur i à la fin du segment seg-1. $\pi_i = S_i / U_i$ avec S_i étant le nombre de fois où l'opérateur i a amélioré la qualité de la

solution et U_i le nombre de fois où l'opérateur i a été sélectionné. Au début, ce score a été réinitialisé à zéro puis incrémenté lorsque l'opérateur i est appliqué lors d'une itération donnée iter pour générer une nouvelle solution. Plus précisément, le nouveau score à l'itération $iter + 1$ devient :

$$\pi_i^{iter+1} = \pi_i^{iter} + \left\{ \begin{array}{c} \sigma 1 : \\ \text{Si une nouvelle meilleure solution a été générée} \\ \\ \sigma 2 : \\ \text{Si la solution générée est meilleure que la solution courante} \\ \\ \sigma 3 : \\ \text{Si la solution générée est acceptée mais qu'elle est moins bonne que la solution courante} \\ \\ \sigma 4 : \\ \text{Si la solution est rejetée} \end{array} \right\} \quad (3.1)$$

$\sigma 1, \sigma 2, \sigma 3$ et $\sigma 4$ sont des paramètres à définir et le paramètre γ contrôle l'inertie dans l'équation de mise à jour des poids. Si γ est proche de 0, les poids ne changent pas beaucoup, et si γ est proche de 1, la mise à jour est influencée par le score le plus récent.

3.7.2.3. La phase constructive

Pour résoudre notre problème de tournées des véhicules de balayage, nous avons procédé par construire une première solution s qui donne la séquence de balayage des tronçons à balayer tout en respectant l'ensemble des contraintes. Une solution arbitraire peut être utilisée pour initialiser l'algorithme RAGV.

Il est largement reconnu que la qualité de la solution initiale n'a pas un impact significatif sur les performances globales de la métaheuristique, tant qu'elle est autorisée à s'exécuter pendant un nombre suffisant d'itérations (Barrena et al., 2014; Coelho et al., 2012; Lahyani et al., 2019; Pereira et al., 2015). Comme nous ne permettons pas l'exploration de solutions non réalisables, la solution initiale doit seulement être réalisable.

Nous définissons par d_{start} le dépôt de départ du premier quart de travail $q = 1$ qui est choisi au hasard de la liste des dépôts. La variable d est le dépôt le plus proche du dernier nœud visité dans la solution initiale s. Dans notre implémentation, chaque quart de travail est construit progressivement en lui ajoutant un arc aléatoire du même type ($R\ ou\ H$) que le premier arc sélectionné tant qu'une durée maximale (Val) n'a pas été dépassée. Si la durée est dépassée, le dernier nœud visité retourne au dépôt le plus proche et un nouveau quart de travail (quart de nuit) est initié à partir du dernier dépôt visité et le processus est répété jusqu'à ce que tous les arcs aient été visités. Nous attribuons des numéros impairs pour les quarts de jour et des numéros pairs pour les quarts de nuit. Nous supposons que le premier quart de travail est un quart de jour. Si les arcs de type H n'ont pas tous encore été visités, ces arcs vont être servis durant les quarts de travail de nuit. Sinon, les arcs de type R seront visités lors du quart de travail de nuit. Le pseudo-code de la construction de la solution initiale est présentée dans le premier article.

3.7.2.4. Les opérateurs

Dans cette sous-section, nous présentons les opérateurs qui ont été présentés au niveau de la littérature ainsi que les opérateurs que nous avons développés pour résoudre notre problème. Ropke et Pisinger (2006) présentent six opérateurs (heuristiques) de destruction et deux opérateurs de reconstruction que nous présentons dans le Tableau 3.3. Nous présentons par la suite les opérateurs que nous avons développés. Dans la résolution de notre problème, un opérateur est un destructeur et reconstructeur à la fois.

Tableau 3. 3
Liste des opérateurs selon Ropke et Pisinger (2006)

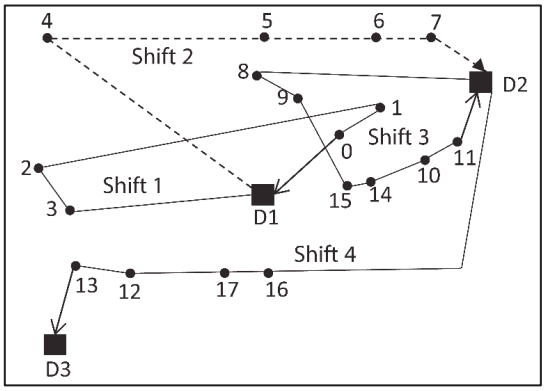
Opérateur		**Explication**
Opérateurs de destruction	*Random removal*	Cette heuristique est la plus simple à appliquer. Elle sélectionne un nombre d'arcs ou de nœuds aléatoirement et les supprime de la solution initiale. Vue l'aspect aléatoire de la recherche et de suppression et la possibilité de sélectionner cet opérateur plusieurs fois au cours des itérations, cet opérateur permet de diversifier la recherche.
	Worst removal	Cette heuristique sélectionne un nombre d'arcs (ou nœuds) qui font augmenter les coûts et qui n'améliorent pas la fonction objectif. Cet opérateur supprime ces arcs (ou nœuds) à coût élevé et les insère dans d'autres positions qui améliorent la fonction objectif.
	Related/Show removal	Cet opérateur a été introduit par Shaw (1998) et qui se base sur la relation qui existent entre les arcs (ou nœuds). L'objectif de cet opérateur est de sélectionner un nombre d'arcs (ou nœuds) qui sont reliés (p.ex. les arcs les plus proches l'un à l'autre) et qui sont donc faciles à les interchanger.
	Cluster removal	Cette heuristique est une variante de l'opérateur Related removal et qui tend à supprimer un groupe d'arcs (ou nœuds) reliées appartenant à la même route.
	Time oriented	Cette heuristique est une autre variante de l'opérateur Related removal et qui tend à supprimer les arcs (ou nœuds) qui sont servis à peu près dans le même intervalle de temps afin de facilement les interchanger dans une seconde étape. Au début, l'opérateur sélectionne au hasard un arc a (ou nœud) et d arcs les plus proches de a. Puis, l'opérateur sélectionne (a-1) arcs à partir des d demandes qui sont les plus liées à a en termes de temps.

	Historical request/node-pair removal	Cette heuristique considère l'amélioration historique de la visite de deux arcs (ou nœuds) en utilisant les informations historiques et la solution courante lors de la suppression des arcs (ou nœuds). Cela permet de juger si une certaine partie a un potentiel d'optimisation et doit donc être supprimée ou non.
Opérateurs de reconstruction	*Basic greedy heuristic*	Cette heuristique consiste à insérer les arcs (ou nœuds) supprimés dans la première position la moins coûteuse d'une route réalisable. Un arc (ou nœud) sera inséré dans une position k lorsqu'une amélioration au niveau de la fonction objectif est encourue.
	Regret heuristic	Cette heuristique consiste à insérer les arcs (ou nœuds) supprimés dans leurs meilleures positions et dans la route qui minimise le plus la valeur de la fonction objectif. Le processus est répété jusqu'à ce que tous les arcs (ou nœuds) soient insérer. Δc_i^q présente la différence de coût avant et après insertion de l'arc i dans sa meilleure position dans la route q la moins coûteuse. L'objectif est de maximiser la différence de coût d'insertion de l'arc i dans sa meilleure route et sa deuxième meilleure route. $\max(\Delta c_i^2 - \Delta c_i^1) \quad i \in U$ Il s'agit d'une heuristique de type regret-2 alors que le premier opérateur de reconstruction est une heuristique de type regret-1.

Source : Ropke et Pisinger (2006)

En considérant cet exemple de solution initiale dans la figure 3.5, nous allons appliquer chaque opérateur successivement pour fournir une description plus complète de la performance des opérateurs. Les arcs (4,5) et (6,7) sont de type H alors que le reste des arcs sont de type R.

Figure 3. 5
Une solution initiale

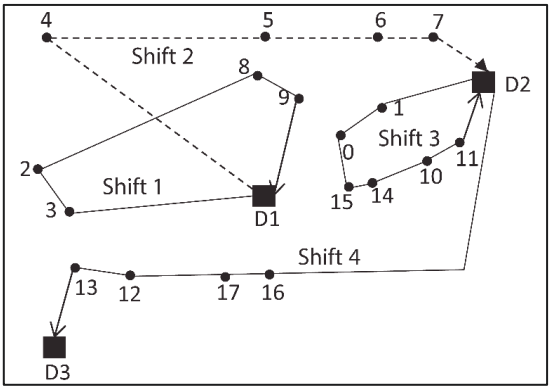


Source : Construction personnelle

- O1: Suppression orientée selon le type avec échange des arcs

Cet opérateur consiste à interchanger les arcs à balayer qui sont de même type. L'opérateur sélectionne deux arcs de même type (soit H ou bien R) d'une façon aléatoire puis les interchange.

Figure 3. 6
Suppression orientée selon le type avec échange des arcs



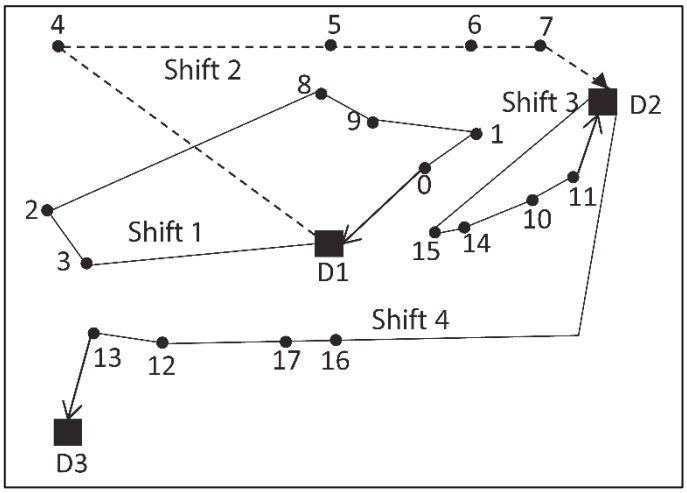
Source : Construction personnelle

Initialement, l'arc (0,1) a été servi lors du quart 1 tandis que l'arc (8,9) a été servi lors du quart 3. Après l'application de l'opérateur O1, l'ordre de service de ces deux arcs du même type R a été interchangé. L'arc (8,9) sera servi lors du quart 1 tandis que l'arc (0,1) sera servi lors du quart 3.

- O2: Suppression aléatoire des arcs – Insertion aléatoire

L'objectif de cet opérateur est de diversifier la recherche. Un arc sélectionné aléatoirement de n'importe quel quart sans considérer le dernier quart, sera supprimé puis inséré dans n'importe quel autre quart sans considérer le dernier quart. Comme présenté dans la Figure 3.6, l'arc (0,1) a été sélectionné de manière aléatoire à partir du quart 3, puis inséré à une position aléatoire dans le quart 1 (Figure 3.7) après l'application de l'opérateur O2.

Figure 3. 7
Suppression aléatoire des arcs – Insertion aléatoire



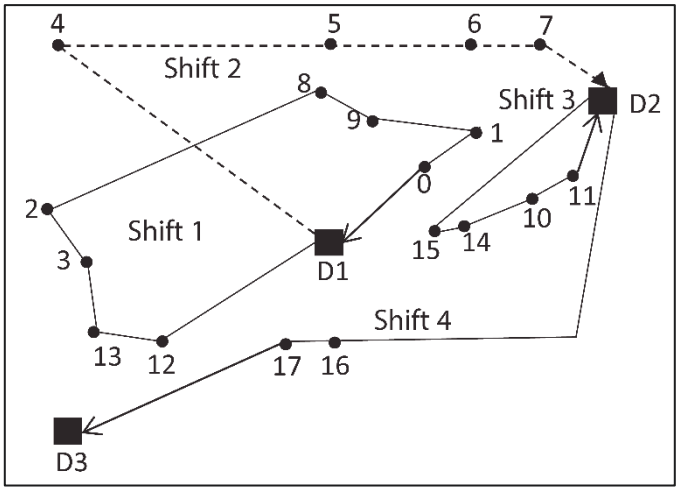
Source : Construction personnelle

- O3: Suppression du meilleur arc – Insertion au plus proche

L'objectif de cet opérateur de destruction/réparation présenté dans la Figure 3.8 est de minimiser le nombre de quarts de travail et le temps total de service. Il consiste

à retirer un arc à servir du dernier quart de travail et à l'insérer dans un autre quart de travail après le nœud le plus proche de lui en termes de temps de déplacement.

Figure 3. 8
Suppression du meilleur arc – Insertion au plus proche



Source : Construction personnelle

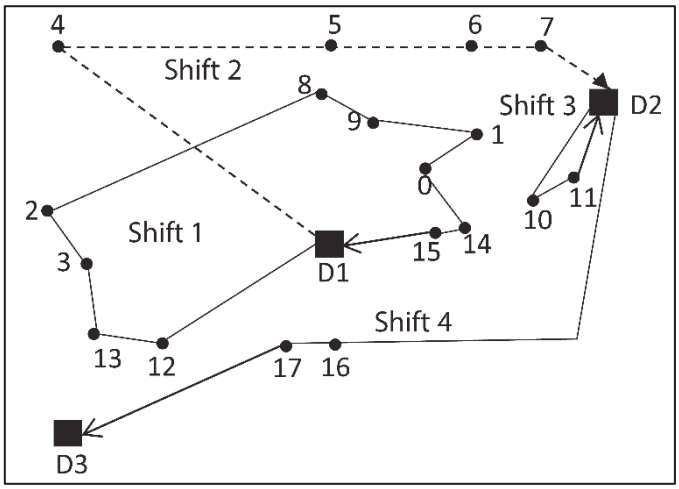
L'opérateur O3 a sélectionné l'arc (12,13) du dernier quart de travail (quart 4) (voir Figure 3.7) et l'a inséré dans le quart 1 (voir Figure 3.8).

Étant donné que l'objectif de ce problème est de minimiser le nombre de quarts de travail ainsi que le temps total de service, cet opérateur peut considérablement contribuer à l'amélioration de la solution actuelle.

- O4: Suppression aléatoire des arcs – Insertion au plus proche

Cet opérateur consiste à enlever aléatoirement un arc de n'importe quel quart sans considérer le dernier quart et l'insérer dans un autre quart dans la meilleure position qui minimise la fonction objectif. Le point d'insertion est après l'arc le plus proche de l'arc enlevé. Après l'application de l'opérateur 4, l'arc (14,15) a été retiré du quart de travail 3 (Figure 3.8) et inséré dans le quart de travail 1 après l'arc (1,0) (Figure 3.9).

Figure 3. 9
Suppression aléatoire des arcs – Insertion au plus proche

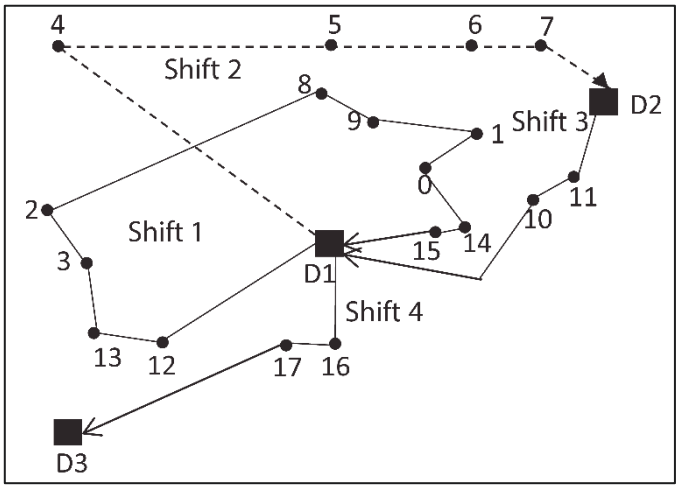


Source : Construction personnelle

- O5: Suppression aléatoire d'un dépôt – Changement aléatoire de dépôt

Cet opérateur présenté dans la figure 3.10 consiste à sélectionner aléatoirement le dépôt d'arrivé d'un quart (également le dépôt de départ du quart suivant) et le remplacer par un autre dépôt choisi d'une façon aléatoire.

Figure 3. 10
Suppression aléatoire d'un dépôt – Changement aléatoire de dépôt



Source : Construction personnelle

La flotte de véhicules a terminé le service du troisième quart de travail au dépôt D2 et a commencé à effectuer le quatrième quart de travail à partir du même dépôt (comme le montre la Figure 3.9). Après l'application de l'opérateur 5, le dépôt a été changé de D2 à D1 (comme le montre la Figure 3.10) car cela minimise le temps de déplacement et, par conséquent, réduit le temps de fin de service dans le quatrième quart de travail.

Les opérateurs que nous avons développés sont conçus pour répondre spécifiquement aux caractéristiques et contraintes uniques de ce problème de tournées de véhicules. En revanche, les opérateurs classiques de la RAGV ont une portée plus large et peuvent être utilisés dans divers scénarios d'optimisation. Nos opérateurs prennent en compte des attributs spécifiques tels que le type d'arc et les affectations de dépôts, ce qui les rend finement accordés aux particularités de notre problème. Cela garantit qu'ils fournissent non seulement des solutions théoriquement performantes, mais également des solutions pratiquement applicables dans un contexte de gestion. Ce qui distingue nos opérateurs, c'est leur double nature, combinant à la fois des actions destructrices et constructives en une seule étape. Cela facilite considérablement l'exploration de nouvelles solutions. Malgré ces différences subtiles, les deux ensembles d'opérateurs partagent des similitudes fondamentales. Ils utilisent en général un ensemble diversifié de techniques d'exploration, comprenant l'intensification pour affiner et optimiser la solution actuelle et la diversification pour explorer un large éventail de solutions. Cette diversité permet une recherche exhaustive de l'espace des solutions.

3.8. DÉMARCHE D'ÉVALUATION PROSPECTIVE D'UNE INNOVATION TECHNOLOGIQUE

Pour répondre à la deuxième question de recherche, nous avons développé une démarche d'évaluation prospective visant à analyser l'impact de l'augmentation de la vitesse de balayage sur la durée et les coûts opérationnels. Par la suite, une projection

des gains est réalisée afin d'appuyer le prestataire de services dans ses décisions d'investissement en brosses plus performantes. Les résultats obtenus fournissent également des repères quantifiés pouvant soutenir une démarche d'amélioration continue du devis technique de conception des brosses innovantes, en orientant les décisions de recherche et développement sur la base d'analyses prospectives de leurs impacts sur les opérations.

3.8.1. Planification des tests numériques

La planification des tests numériques constitue la première étape de la démarche d'évaluation prospective. Elle consiste d'abord à définir l'intervalle de vitesses de balayage à analyser. Les valeurs choisies varient de 2,9 km/h à 19,9 km/h, avec des paliers de 1 km/h. La plage de vitesses testée couvre à la fois des valeurs plausibles sur le plan opérationnel (jusqu'à environ 15 km/h), correspondant aux vitesses généralement observées en pratique, ainsi que des scénarios exploratoires de borne supérieure (au-delà de 15 km/h). Ces derniers ne visent pas nécessairement des objectifs d'exploitation réalistes, mais servent plutôt à évaluer la sensibilité des coûts et de la durée des opérations aux variations de vitesse. Cette distinction est appuyée par la littérature. En effet, Fayzullayevich et al. (2022) montrent, à l'aide de simulations numériques, que l'efficacité d'aspiration des balayeuses à air régénératif dépend fortement de la vitesse. Lorsque celle-ci augmente, la capture des particules diminue en raison d'un temps d'interaction plus court et de conditions d'écoulement d'air moins favorables. Par conséquent, les gains de performance observés à des vitesses plus élevées doivent être interprétés avec prudence et restent conditionnels au maintien d'un niveau de qualité de nettoyage acceptable.

Sur cette base, les indicateurs de performance étudiés sont la réduction du nombre de jours de travail, de la durée et du coût total des opérations ainsi que les économies associées. Une base de référence est également établie en utilisant les données sur les indicateurs de performance pour la vitesse conventionnelle de 2,9 km/h.

Cette référence sert de point de comparaison pour quantifier les gains potentiels associés aux différentes vitesses de balayage et évaluer leurs retombées opérationnelles et économiques.

3.8.2. Exécution des tests numériques

Au niveau de cette étape, les tests numériques ont été réalisés en mobilisant à la fois l'heuristique de construction et la métaheuristique RAGV. Les méthodes ont été évaluées sur des instances de 100, 150 et 200 nœuds, comportant chacune 4 dépôts, et générées à partir des instances de MDVRP proposées par Cordeau (http ://neumann.hec.ca/chairedistributique/data/mdvrp/new). Pour chaque taille, cinq sous-ensembles d'instances ont été produits. Au total, quinze instances fictives et deux instances réelles (Victoriaville et Nicolet) ont été analysées.

Pour répondre à la deuxième question de recherche, on a considéré la vitesse de balayage comme un paramètre variable tout en évaluant, pour chaque scénario, la durée totale des opérations, le nombre de quarts de travail ainsi que les coûts totaux associés. Pour chaque vitesse de balayage prédéfinie, les temps de service sont recalculés au sein de l'algorithme RAGV, lequel génère ensuite une solution de routage visant à minimiser à la fois la durée totale des opérations et le nombre de quarts de travail.

La métaheuristique RAGV a été appliquée 30 fois afin de tenir compte de son caractère stochastique et d'obtenir des résultats robustes. Le coût total est ensuite déterminé dans une étape de post-traitement, en appliquant une fonction de coût aux solutions de tournées obtenues par RAGV, élaborée sur la base d'échanges avec le prestataire de services, qui a fourni des estimations de coûts opérationnels représentatifs associés au système novateur.

Pour une équipe de jour, le coût variable de déplacement est estimé à 511$/h alors que celui du balayage s'élève à 600$/h. Pour une équipe de nuit, le coût variable

de déplacement est de 627$/h et celui du balayage de 706$/h. Le coût fixe par quart est de 2420$ pour le jour et de 2635$ pour la nuit. Le Tableau 3.4 suivant présente la synthèse de ces coûts et les détails du coût fixe.

Tableau 3. 4
Détails des coûts fixes et variables

Coûts	**Quart de jour**	**Quart de nuit**
Coûts Variables		
Coût de déplacement ($/h)	511	627
Coût de balayage ($/h)	600	706
Coûts fixes		
Coût fixe par quart ($)	2420	2635
Détails des coûts fixes		
Planification des itinéraires (3h/quart)	270	270
Maintenance (30 min/machine)	45	45
Inspection (15 min/machine)	20	20
Contremaitre (2h/quart)	180	180
Pension (150$/personne)	900	1050
Administration (2-3h/quart)	180	180
Autres frais	500	500

Source : Construction personnelle

Le coût total des opérations est calculé à l'aide d'une fonction de coût appliquée aux solutions de tournées générées par la métaheuristique RAGV. Cette fonction combine les coûts variables de déplacement et de balayage, qui diffèrent selon le quart de travail (jour ou nuit), ainsi que les coûts fixes associés à chaque quart. Les temps de service et de déplacement de chaque arc sont utilisés pour calculer le coût variable, auquel s'ajoutent les coûts fixes des quarts nécessaires à l'exécution des opérations. Le pseudo-code suivant présente les principales étapes de calcul de cette fonction de coût total (Z(s)).

Pseudo-code de la fonction coût total Z(s)

Calculer_Z(s)

Coût_variable ← 0

Pour chaque arc (i, j) dans s **Faire**

Si (q = q_p**) alors**

Si ($(i, j) \in (H \cup R)$**) alors**

Coût (i, j) ← 706 S_{ij}

Sinon

Coût (i, j) ← 627 t_{ij}

Sinon

Si ($(i, j) \in R$**) alors**

Coût(i, j) ← 600 S_{ij}

Sinon

Coût (i, j) ← 511 t_{ij}

Fin

Coût_variable ← Coût_variable + Coût (i, j)

Fin pour

Coût_fixe ← (2420 × nombre de quarts impairs) + (2635 × nombre de quarts pairs)

Z(s) ← coût_variable + coût_fixe

Retourner Z(s)

3.8.3. Analyse des résultats

La troisième étape de la démarche consiste à analyser les résultats obtenus. Après l'exécution des tests numériques pour l'ensemble des vitesses de balayage, une analyse détaillée des résultats a été réalisée afin d'évaluer l'impact réel de l'augmentation de la vitesse sur les principaux indicateurs de performance opérationnelle.

Les analyses portent sur la réduction de la durée opérationnelle, la diminution du nombre de quarts nécessaires et la baisse du coût total d'exécution des opérations. Les résultats sont présentés sous forme de tableaux et graphiques montrant les pourcentages de réduction de chacun de ces indicateurs en fonction de la vitesse de balayage.

Cette étape joue un rôle central dans la démarche d'évaluation prospective. Elle permet de comparer les performances des différents scénarios de vitesse et d'identifier ceux offrant le meilleur potentiel d'amélioration sur les plans opérationnel et économique. Les résultats obtenus constituent ainsi une base quantitative pour orienter les décisions relatives au développement de brosses plus performantes et soutenir une démarche d'amélioration continue du devis technique de leur conception.

3.9.1. Projection des gains et soutien à la décision d'investissement

À partir des résultats d'analyse, cette dernière étape vise à définir des orientations concrètes afin de soutenir le prestataire de services dans sa prise de décision. Les réductions potentielles de coûts et de durée associées aux différentes vitesses de balayage constituent des éléments essentiels pour éclairer de futurs investissements en R&D, notamment en ce qui concerne la conception de brosses de balayage adéquates au système novateur.

En outre, un calcul des gains projetés a été effectué afin de quantifier, en termes opérationnels et financiers, les économies potentielles générées par l'adoption d'une vitesse de balayage accrue. Cette projection repose sur une saison de référence de 86,4 jours, fournie par le prestataire de service, à laquelle une variation de ±15 à ±20 % a été appliquée afin d'examiner les effets potentiels des fluctuations de la durée de la saison.

Cette approche permet d'obtenir une vision plus robuste et plus représentative des gains envisageables. Ces résultats supportent également les analyses économiques subséquentes, telles que l'estimation du retour sur investissement.

Les résultats obtenus fournissent des repères quantifiés permettant d'appuyer une démarche d'amélioration continue du devis technique de conception des brosses innovantes, en orientant les décisions de R&D sur la base d'analyses prospectives de leurs impacts opérationnels et économiques.

3.9. MODÉLISATION DES MPV

Pour répondre à la troisième question de recherche, nous nous sommes basés sur la littérature et noua avons identifié 7 MPV. Le MPV 1 inclut les spécifications techniques environnementales et les normes, le MPV 2 se concentre sur la pondération des critères de performance environnementale, le MPV 3 contient les mesures incitatives comme les marges préférentielles, le MPV 4 traite les bonus pour seulement amortir le coût initial d'adoption d'une éco-innovation alors que le MPV 5 définit les bonus/pénalités qui sont directement liés à la performance environnementale, le MPV 6 étudie la pondération dynamique des critères où les coefficients de pondération évoluent progressivement au fil du temps, reflétant une montée graduelle des exigences environnementales et enfin, le MPV 7 présente les mécanismes de contrôle. Le Tableau 3.5 suivant résume les différents MPV identifiés.

Tableau 3. 5
Classification et analyse critique des MPV

MPV	Description	Avantages	Limites	Références
1	-Pourcentage ou seuil minimal de performance d'émissions -Exigence de certificats ou déclarations officielles de conformité environnementale -Utilisation de technologies innovantes et moins polluantes	-Simple à appliquer -Garantit un minimum environnemental	-Rigidité : seuls les fournisseurs sous le seuil restent admissibles, excluant des acteurs pourtant proches	(Ahmed et al., 2024; EU, 2022; OECD, 2024, 2025b)
2	-Intégration des critères environnementaux avec un poids spécifique	-Permet d'équilibrer coût et critères environnementaux. -Adaptable à tout marché	-Difficulté à définir des pondérations transparentes et scientifiquement justifiées entre coût et impact environnemental	(EU, 2022; Menon et Ravi, 2022; OECD, 2024, 2025a; Testa et al., 2016)
3	-Application de marges préférentielles favorisant les soumissions éco-innovantes	-Protège les entreprises innovantes à court terme	-Efficacité dépendante du niveau de concurrence et de la dispersion des prix entre soumissionnaires	(Chiappinelli et Seres, 2024; Lichère, 2025)
4	-Mécanismes incitatifs spécifiques (bonus, étalement financière des coûts additionnels liés à l'éco-innovation)	-Encourage les innovations vertes initiales	-Fournisseurs non initialement bénéficiaires du bonus pouvant percevoir la mesure comme injuste ou discriminatoire	(EU, 2022; OECD, 2024; Oz, 2024; Scherz et al., 2023)
5	-L'autorité publique fixe une cible (ex. X tonnes de CO_2) et attribue un bonus/malus en fonction de sa performance environnementale	-Incitatif fort et mesurable	-Paramétrage délicat des coefficients	(Caruana et Vassallo, 2024; EU,

				2022; Scherz et al., 2023)
6	-Les coefficients de pondération évoluent dans le temps selon une fonction d'apprentissage	-Progressivité -Accompagnement des PME -Plus acceptable socialement	-Nécessite une planification pluriannuelle et un suivi normatif	(Su et al., 2019)
7	-Mise en place de mécanismes de contrôle qualité et de suivi environnemental (audits, rapports) -Définir des modalités de pénalités en cas de non-respect de la performance environnementale -Prévoir des clauses de révision en fonction des résultats observés	-Trace la performance réelle -Favorise la transparence	-Mesure des écarts d'émission réels complexe et coûteux -Variabilité des données -Manque d'outils de suivi harmonisés	(EU, 2022; IISD, 2024; Lichère, 2025; OECD, 2024)

Source : Construction personnelle

3.9.1. Formulation des modèles de MPV

Au niveau de la littérature, les MPV sont généralement présentés sous des formes adaptées à leur contexte d'application et aux objectifs environnementaux visés. Dans le cadre de cette thèse, les 7 MPV sont formulés à partir de modèles provenant de divers cadres d'application, notamment ceux utilisés dans le secteur de la construction (Ahmed et al., 2024; Scherz et al., 2023; Su et al., 2019). D'autres formulations s'appuient également sur les descriptions explicites présentées dans les rapports institutionnels de l'Union européenne, de l'OECD et de l'IISD, qui détaillent les mécanismes les plus courants des MPV. Cette double démarche permet de garantir la représentativité des principaux types de MPV observés dans la pratique. Chaque MPV est présenté avec sa formulation mathématique, adaptée pour inclure des critères environnementaux exprimés sous forme de coûts (éq. CO_2 comme ci-dessous, consommation d'énergie, etc.) et un coût pour le fournisseur de service i. Les variables sont normalisées afin de faciliter la comparaison entre fournisseurs et d'assurer l'équité dans l'évaluation. La partie suivante détaille les notations utilisées pour la modélisation des différents modèles de MPV.

Ensembles et indices

K ={k∈ IN*} : ensemble des critères environnementaux considérés

I ={i=1,…,m} : ensemble des fournisseurs éligibles

$I^{ne} = \{i \notin I\}$: ensemble des fournisseurs non-éligibles

Paramètres de coûts

C_i : représente le coût en $ du fournisseur ou système éligible i ∈ I

C_i^{ne} : représente le coût en $ du fournisseur ou système non-éligible i ∈ I^{ne}

$C_{min} = min_{i \in I} C_i$: coût minimal parmi tous les fournisseurs éligibles

$C_{max} = max_{i \in I} C_i$: coût maximal parmi tous les fournisseurs classiques éligibles

$C_{min}^{ne} = min_{i \in I^{ne}} C_i^{ne}$: coût minimal parmi tous les fournisseurs non-éligibles

Paramètres de performance environnementale

E_{ik} : représente la valeur du critère environnemental k $\in K$ pour le fournisseur ou système i

$E_{k,min} = min_{i \in I} E_{ik} \ \forall k \in K$: minimum du critère k parmi tous les fournisseurs

$E_{k,max} = max_{i \in I} E_{ik} \ \forall k \in K$: maximum du critère k parmi tous les fournisseurs

Pondérations et mécanismes incitatifs

w_C : poids du coût dans la pondération

w_k : poids du critère environnemental k dans la pondération

w_k^0 : poids initial du critère k

w_k^{max} : poids maximal du critère k

α : la marge préférentielle (%)

b_0 : le bonus initial

λ : le taux de décroissance du bonus

t : la période d'évaluation

δ : bonus d'éco-innovation (%)

T_k : la cible environnementale du critère k ($t\ éq.CO_2$)

z_k : le prix d'ombre ($\$/t\ éq.CO_2$)

β_k : le coefficient de pénalité ($\$/t\ éq.CO_2$)

λ_1 : vitesse de montée du poids environnemental

$Score_i$: le score du fournisseur i

M_k : Seuil maximal du critère environnemental k

MPV 1 – Seuil d'éligibilité

Le MPV 1 définit un seuil maximal M_k pour chaque critère environnemental k. Les fournisseurs dépassant ce seuil sont exclus de la sélection. Les fournisseurs restants seront évalués par la suite selon l'un des MPV ci-dessous.

$$Score_i = \begin{Bmatrix} 1 \; si \; E_{ik} < M_k \; \forall \; k \\ 0 \quad sinon \end{Bmatrix} \tag{3.2}$$

MPV 2 – Pondération multicritères

Le MPV 2 combine le coût et plusieurs critères environnementaux pondérés avec $w_C + \sum_{k=1}^{n} w_k = 1$. Cette approche permet d'intégrer plusieurs objectifs et de moduler la contribution relative de chaque critère vert.

$$Score_i = w_C \frac{C_{max} - C_i}{C_{max} - C_{min}} + \sum_{k=1}^{n} w_k \frac{E_{k,max} - E_{ik}}{E_{k,max} - E_{k,min}} \tag{3.3}$$

MPV 3 – Marge préférentielle

Le MPV 3 consiste à appliquer une diminution artificielle α (marge préférentielle) au coût C_i soumis par le fournisseur innovant.

$$C_i' = \begin{Bmatrix} C_i(1-\alpha) \; si \; i \; est \; innovateur \\ C_i \quad sinon \end{Bmatrix} \tag{3.4}$$

$$Score_i = w_C \frac{C_{max} - C'_i}{C_{max} - C_{min}} + \sum_{k=1}^{n} w_k \frac{E_{k,max} - E_{ik}}{E_{k,max} - E_{k,min}} \tag{3.5}$$

MPV 4 – Bonus

L'objectif de ce MPV est de modéliser un soutien forfaitaire qui décroît, indépendamment de la performance environnementale réelle ou anticipée. Par exemple pour amortir le coût initial d'adoption d'une éco-innovation sur plusieurs années, mais sans lier directement au gain environnemental. Le fournisseur innovant obtient un bonus à son $Score_i$ décroissant dans le temps (p.ex., subvention partielle sur 2-3 ans) avec b_0 est le bonus initial et λ est le taux de décroissance. L'évaluation des scores est faite à chaque période t.

$$Score_i = \frac{C_{max} - C_i}{C_{max} - C_{min}} + b_0 e^{-\lambda t} \quad (3.6)$$

MPV5 – Bonus et malus

Au niveau du MPV 5, le bonus est directement lié à la performance environnementale supérieure à la cible T_k avec l'éco-innovation. Initialement le prix du novateur est réduit via un bonus d'éco-innovation δ choisi par la politique publique. Par la suite, ce prix est réduit en fonction de chaque unité réduite du critère vert par rapport à la cible T_k, multipliée par le prix d'ombre z_k correspondant à la période d'évaluation.

Aussi, si un fournisseur s'éloigne (au-dessus) de la cible T_k, sa soumission sera pénalisée proportionnellement avec un coefficient de pénalité β_k.

Le coût corrigé $C_i' = \begin{cases} C_i(1-\delta) - \sum_{k=1}^{n} z_k(T_k - E_{ik}) \;\; si\; E_{ik} \leq T_k \\ C_i + \sum_{k=1}^{n} \beta_k(E_{ik} - T_k) \;\; si\; E_{ik} > T_k \end{cases}$ (3.7)

$$Score_i = \frac{C_{max} - C'_i}{C_{max} - C_{min}} \quad (3.8)$$

MPV6 - Pondération dynamique

Le MPV 6 fait évoluer dynamiquement le poids environnemental $w_k(t)$ au fil du temps. Cette approche progressive permet d'accompagner les fournisseurs vers la transition verte.

$$w_k(t) = w_k^0 + (w_k^{max} - w_k^0)\left(1 - e^{-\lambda_1 t}\right) \quad (3.9)$$

$$w_c(t) = 1 - w_k(t) \quad (3.10)$$

$$Score_i = w_C(t)\frac{C_{max} - C_i}{C_{max} - C_{min}} + \sum_{k=1}^{n} w_k(t)\frac{E_{k,max} - E_{ik}}{E_{k,max} - E_{k,min}} \quad (3.11)$$

MPV7 – Contrôle

Au niveau du MPV 7, l'autorité publique réalise des contrôles post-marché et applique une pénalité β_k en cas de non-respect des critères soumis.

$$Pénalité\ P_i = \sum_{k=1}^{n} \beta_k * \max\left(0, E_{ik,real} - E_{ik}\right) \quad (3.12)$$

Par souci de concision, dans le cadre de cette thèse, on a considéré seulement les émissions de GES comme critère environnemental (k=1). Le Tableau 3.6 suivant résume les différents paramètres utilisés et leurs valeurs en se basant sur la littérature.

Tableau 3. 6
Les différents paramètres utilisés au niveau des MPV

Paramètres	MPV	Valeurs	Références
α	MPV3	$\alpha \in [0.05, 0.1]$	(Lichère, 2025)
w_C, w_1	MPV2, MPV3	$w_C = 0.7,\ w_1 = 0.3$	(Braulio-Gonzalo et Bovea, 2020; Lichère, 2025)
b_0	MPV4	$b_0 = 0.1$	(Chiappinelli et Seres, 2024)
λ, T, t	MPV4	$\lambda = \frac{\ln(2)}{T}$, T={1.5, 2, 4}, $t \in$ [0,5]	(Oz, 2024; Zhang et Jiang, 2022)
z_k	MPV5	$z_1 = [130, 400\$/téq.CO_2]$	(Gamtessa et Çule, 2022; Scherz et al., 2023)
β_k	MPV5, MPV7	$\beta_1 = [130, 400\$/téq.CO_2]$	(Gamtessa et Çule, 2022; Scherz et al., 2023)
δ	MPV5	$\delta = 0.1$	(Chiappinelli et Seres, 2024)
$w_k^0, w_k^{max}, \lambda_1$, t	MPV6	$w_1^0 = 0.1, w_1^{max} = 0.3$, $\lambda_1 = 0.2, t \in [0,4]$	(Braulio-Gonzalo et Bovea, 2020; Lichère, 2025)

Source : Construction personnelle

3.9.2. Détermination des surcoûts

Le service de balayage constitue une activité récurrente, réalisée annuellement, pour laquelle les autorités publiques disposent d'un historique des coûts soumis. Sur cette base, et en tenant compte d'un budget limité, l'autorité publique pourrait estimer dès la préparation de l'appel d'offres un surcoût initial $S'_m(\%)$ qu'elle est disposée à payer pour s'assurer de l'octroi du contrat à une soumission du fournisseur avec l'éco-innovation. Ainsi, on définit par $S_m(\%)$ le surcoût qui est déduit à partir du point d'indifférence entre le score du fournisseur innovant i et le score du fournisseur j qui a soumis le prix le moins cher. La comparaison entre $S'_m(\%)$ et $S_m(\%)$ permet alors de vérifier si la récompense de l'éco-innovation implique un paiement supérieur au surcoût initialement par l'autorité publique.

Pour le MPV1, le surcoût est calculé entre le plus bas prix présenté par le fournisseur éligible et celui non-éligible. Il présente le minimum que l'autorité pourrait payer pour privilégier un fournisseur respectant le seuil environnemental plutôt qu'un fournisseur moins coûteux mais exclut en raison de ses performances environnementales. On suppose que $C_i = C_j(1 + S_m/100)$, $C_{min} = C_j$ et $E_{1,min} = E_{i1}$.

MPV 1 : Seuil d'éligibilité

$$S_m(\%) = 100 * (C_{min} - C_{min}^{ne})/C_{min}^{ne} \tag{3.13}$$

MPV 2 : Pondération multicritères

Au point d'indifférence, on a :

$$Score_i = Score_j \tag{3.14}$$

$$w_C \frac{C_{max} - C_i}{C_{max} - C_{min}} + w_1 \frac{E_{1,max} - E_{i1}}{E_{1,max} - E_{1,min}} = w_C \frac{C_{max} - C_j}{C_{max} - C_{min}} + w_1 \frac{E_{1,max} - E_{j1}}{E_{1,max} - E_{1,min}} \tag{3.15}$$

$$w_C \frac{C_{max} - C_j(1 + S_m)}{C_{max} - C_j} + w_1 \frac{E_{1,max} - E_{i1}}{E_{1,max} - E_{i1}} = w_C \frac{C_{max} - C_j}{C_{max} - C_j} + w_1 \frac{E_{1,max} - E_{j1}}{E_{1,max} - E_{i1}} \quad (3.16)$$

$$w_C \frac{C_{max} - C_j(1 + S_m)}{C_{max} - C_j} + w_1 = w_C + w_1 \frac{E_{1,max} - E_{j1}}{E_{1,max} - E_{i1}} \quad (3.17)$$

$$w_C \frac{C_{max} - C_j - C_j\, S_m}{C_{max} - C_j} + w_1 = w_C + w_1 \frac{E_{1,max} - E_{j1}}{E_{1,max} - E_{i1}} \quad (3.18)$$

$$w_C \left(1 - \frac{C_j\, S_m}{C_{max} - C_j}\right) + w_1 = w_C + w_1 \frac{E_{1,max} - E_{j1}}{E_{1,max} - E_{i1}} \quad (3.19)$$

Développons :

$$w_C - w_C \frac{C_j\, S_m}{C_{max} - C_j} + w_1 = w_C + w_1 \frac{E_{1,max} - E_{j1}}{E_{1,max} - E_{i1}} \quad (3.20)$$

$$-w_C \frac{C_j\, S_m}{C_{max} - C_j} + w_1 = w_1 \frac{E_{1,max} - E_{j1}}{E_{1,max} - E_{i1}} \quad (3.21)$$

$$-w_C \frac{C_j\, S_m}{C_{max} - C_j} = w_1 \left(\frac{E_{1,max} - E_{j1}}{E_{1,max} - E_{i1}} - 1\right) \quad (3.22)$$

$$-w_C \frac{C_j\, S_m}{C_{max} - C_j} = w_1 \left(\frac{E_{i1} - E_{j1}}{E_{1,max} - E_{i1}}\right) \quad (3.23)$$

Alors,

$$S_m(\%) = 100 * \frac{w_1 \left(C_{max} - C_j\right)\left(E_{j1} - E_{i1}\right)}{w_C\, C_j \left(E_{1,max} - E_{i1}\right)} \quad (3.24)$$

MPV 3 : Marge préférentielle

Au point d'indifférence, on trouve :

$$w_C \frac{C_{max} - C'_i}{C_{max} - C_{min}} + w_k \frac{E_{1,max} - E_{i1}}{E_{1,max} - E_{1,min}} = w_C \frac{C_{max} - C_j}{C_{max} - C_{min}} + w_k \frac{E_{1,max} - E_{j1}}{E_{1,max} - E_{1,min}} \quad (3.25)$$

$$w_C \frac{C_{max} - C_j(1+S_m)(1-\alpha)}{C_{max} - C_j} + w_1 \frac{E_{1,max} - E_{i1}}{E_{1,max} - E_{i1}} = w_C \frac{C_{max} - C_j}{C_{max} - C_j} + w_1 \frac{E_{1,max} - E_{j1}}{E_{1,max} - E_{i1}} \quad (3.26)$$

$$w_C \frac{C_{max} - C_j(1+S_m)(1-\alpha)}{C_{max} - C_j} + w_1 = w_C + w_1 \frac{E_{1,max} - E_{j1}}{E_{1,max} - E_{i1}} \quad (3.27)$$

$$w_C \frac{C_{max} - C_j(1+S_m)(1-\alpha)}{C_{max} - C_j} = w_C + w_1 \frac{E_{i1} - E_{j1}}{E_{1,max} - E_{i1}} \quad (3.28)$$

$$\frac{C_{max} - C_j(1+S_m)(1-\alpha)}{C_{max} - C_j} = 1 + \frac{w_1}{w_C} \frac{E_{i1} - E_{j1}}{E_{1,max} - E_{i1}} \quad (3.29)$$

$$-C_j(1+S_m)(1-\alpha) = \left(C_{max} - C_j\right) \frac{w_1}{w_C} \frac{E_{i1} - E_{j1}}{E_{1,max} - E_{i1}} - C_j \quad (3.30)$$

$$-C_j(1-\alpha) - C_j(1-\alpha)S_m = \left(C_{max} - C_j\right) \frac{w_1}{w_C} \frac{E_{i1} - E_{j1}}{E_{1,max} - E_{i1}} - C_j \quad (3.31)$$

$$-C_j(1-\alpha)S_m = \left(C_{max} - C_j\right) \frac{w_1}{w_C} \frac{E_{i1} - E_{j1}}{E_{1,max} - E_{i1}} - C_j\alpha \quad (3.32)$$

Alors,

$$S_m = \frac{C_j\alpha - \left(C_{max} - C_j\right) \frac{w_1}{w_C} \frac{E_{i1} - E_{j1}}{E_{1,max} - E_{i1}}}{C_j(1-\alpha)} \quad (3.33)$$

$$S_m(\%) = 100 \left(\frac{\alpha - \frac{w_1 \, (C_{max} - C_j)(E_{i1} - E_{j1})}{w_C \, C_j(E_{1,max} - E_{i1})}}{1-\alpha} \right) \quad (3.34)$$

MPV 4 : Bonus

Au point d'indifférence, on trouve :

$$\frac{C_{max} - C_i}{C_{max} - C_{min}} + b_0 e^{-\lambda t} = \frac{C_{max} - C_j}{C_{max} - C_{min}} \tag{3.35}$$

$$\frac{C_{max} - C_j(1 + S_m)}{C_{max} - C_j} + b_0 e^{-\lambda t} = 1 \tag{3.36}$$

$$1 - \frac{C_j S_m}{C_{max} - C_j} + b_0 e^{-\lambda t} = 1 \tag{3.37}$$

Alors,

$$S_m(\%) = 100 * \frac{b_0 e^{-\lambda t}\left(C_{max} - C_j\right)}{C_j} \tag{3.38}$$

MPV5 : Bonus et malus

On a

$$\text{Le coût corrigé } C_i' = \begin{Bmatrix} C_i(1-\delta) - \sum_{k=1}^{n} z_k(T_k - E_{ik}) \;\; si\; E_{ik} \le T_k \\ C_i + \sum_{k=1}^{n} \beta_k(E_{ik} - T_k) \;\; si\; E_{ik} > T_k \end{Bmatrix} \tag{3.39}$$

Au point d'indifférence, on trouve :

$$\frac{C_{max} - C'_i}{C_{max} - C_{min}} = \frac{C_{max} - C'_j}{C_{max} - C_{min}} \tag{3.40}$$

$$\frac{C_{max} - C_i(1-\delta) + z_1(T_1 - E_{i1})}{C_{max} - C_j} = \frac{C_{max} - C_j - \beta_1(E_{i1} - T_1)}{C_{max} - C_j} \tag{3.41}$$

$$-C_j(1 + S_m)(1-\delta) + z_1(T_1 - E_{i1}) = -C_j - \beta_1(E_{i1} - T_1) \tag{3.42}$$

$$(1 + S_m) = \frac{C_j + \beta_1(E_{i1} - T_1) + z_1(T_1 - E_{i1})}{C_j(1-\delta)} \tag{3.43}$$

$$S_m(\%) = 100 * \frac{z_1(T_1 - E_{i1}) + \beta_1\left(E_{j1} - T_1\right) + \delta * C_j}{C_j(1-\delta)} \tag{3.44}$$

MPV6 : Pondération dynamique

Au point d'indifférence, on trouve :

$$w_C(t)\frac{C_{max} - C_i}{C_{max} - C_{min}} + w_1(t)\frac{E_{1,max} - E_{i1}}{E_{1,max} - E_{1,min}} = w_C(t)\frac{C_{max} - C_j}{C_{max} - C_{min}} + w_1(t)\frac{E_{1,max} - E_{j1}}{E_{1,max} - E_{1,min}} \tag{3.45}$$

$$w_C(t)\frac{C_{max} - C_i}{C_{max} - C_j} + w_1(t) = w_C(t) + w_1(t)\frac{E_{1,max} - E_{j1}}{E_{1,max} - E_{i1}} \tag{3.46}$$

$$w_C(t)\frac{C_{max} - C_j(1 + S_m)}{C_{max} - C_j} + w_1(t) = w_C(t) + w_1(t)\frac{E_{1,max} - E_{j1}}{E_{1,max} - E_{i1}} \tag{3.47}$$

$$w_C(t)\frac{C_{max} - C_j - C_j\, S_m}{C_{max} - C_j} + w_1(t) = w_C(t) + w_1(t)\frac{E_{1,max} - E_{j1}}{E_{1,max} - E_{i1}} \tag{3.48}$$

$$w_C(t)\left(1 - \frac{C_j\, S_m}{C_{max} - C_j}\right) + w_1(t) = w_C(t) + w_1(t)\frac{E_{1,max} - E_{j1}}{E_{1,max} - E_{i1}} \tag{3.49}$$

$$-w_C(t)\frac{C_j\, S_m}{C_{max} - C_j} + w_1(t) = w_1(t)\frac{E_{1,max} - E_{j1}}{E_{1,max} - E_{i1}} \tag{3.50}$$

$$w_C(t)\frac{C_j\, S_m}{C_{max} - C_j} = w_1(t)(1 - \frac{E_{1,max} - E_{j1}}{E_{1,max} - E_{i1}}) \tag{3.51}$$

$$S_m = \frac{w_1(t)\,(C_{max} - C_j)(E_{j1} - E_{i1})}{w_C(t)\,C_j\left(E_{1,max} - E_{i1}\right)} \tag{3.52}$$

On a :

$$w_1(t) = w_1^0 + (w_1^{max} - w_1^0)\left(1 - e^{-\lambda_1 t}\right) \tag{3.53}$$

$$w_c(t) = 1 - w_1(t) = 1 - w_1^0 - (w_1^{max} - w_1^0)\left(1 - e^{-\lambda_1 t}\right) \tag{3.54}$$

$$w_c(t) = 1 - w_1^{max} + (w_1^{max} - w_1^0)e^{-\lambda_1 t} \tag{3.55}$$

Alors,

$$S_m(\%) = 100 * \frac{(w_1^0 + (w_1^{max} - w_1^0)\left(1 - e^{-\lambda_1 t}\right))\ (C_{max} - C_j)(E_{j1} - E_{i1})}{1 - w_1^{max} + (w_1^{max} - w_1^0)e^{-\lambda_1 t} C_j\left(E_{1,max} - E_{i1}\right)} \quad (3.56)$$

MPV7 : Contrôle

Le MPV 7 ne permet pas d'estimer le surcoût car l'autorité publique met en place un mécanisme de contrôle post-marché visant à vérifier la conformité des performances réelles aux engagements environnementaux soumis lors de l'appel d'offres.

3.9.3. Formulation des modèles d'émissions de GES

Dans le cadre de cette étude, nous comparons deux fournisseurs (systèmes) de service, un classique (SC) et un innovant (SN). Le système novateur comprend un balai novateur (Bn), un balai classique (Bc) et quatre camions (Ca) spécialisés (deux camions bennes, un camion-citerne d'eau et un camion atténuateur d'impact). En comparaison, le système classique est composé de deux balais classiques et de la même composition de camions.

La vitesse moyenne de balayage (SS) retenue pour le système innovant est de 2,9 km/h, avec une vitesse de déplacement (MS) de 27,8 km/h, alors que pour le système classique ces valeurs sont respectivement de 2,5 km/h pour le balayage et 19,8 km/h pour le déplacement. Le temps d'attente lors du déchargement est estimé nul du fait de la rotation synchronisée des deux camions bennes. Lorsqu'un camion est plein, l'autre prend immédiatement le relais, optimisant ainsi le flux de travail. Les phases d'attente correspondent essentiellement aux périodes de coordination inter-véhicules, de maintenance et de pauses du personnel. Pour un quart de travail, les attentes représentent en moyenne Att_{SN} =23,4 % du temps total pour le système novateur et Att_{SC} =23,73 % pour le système classique.

Les modèles détaillés de consommation de carburant (Tableau 3.7) utilisés pour le calcul des émissions ont été élaborés à partir des travaux de Ben Daya et al. (2024) qui proposent des fonctions analytiques différenciées selon l'état du véhicule en balayage (Bal), déplacement (Dep) ou attente (Att). Pour l'estimation des émissions de GES des plans de balayage, la métaheuristique RAGV développée a été adaptée à chaque système afin de générer des plans opérationnels reflétant les conditions réelles d'un appel d'offres du MTQ pour le balayage de Victoriaville et Nicolet. En appliquant RAGV séparément pour chacun des deux systèmes (novateur et classique), la fonction objectif a été reformulée pour minimiser les émissions totales de GES. Selon EEA (2023), le facteur d'émission fe est estimé à 2,68 kg éq. CO_2 par litre de diesel. En 2025 au Québec, le coût carbone cr est estimé à 0,095 $ CA par kg éq. CO_2 (Gouvernement du Canada, 2025).

Tableau 3. 7
Les modèles de consommation de carburant

Véhicules	État	Consommation de carburant (L/h)
Balai novateur	Balayage	$FC_{BnBal} = SS(0.2163SS^2 - 3.2737SS + 15.432)$ (3.57)
	Déplacement	$FC_{BnDep} = MS(0.0002MS^2 - 0.00246MS + 1.0622)$ (3.58)
	Attente	$FC_{BnAtt} = 4.64$ (3.59)
Balai classique	Balayage	$FC_{BcBal} = SS(0.17304SS^2 - 2.61896SS + 12.344)$ (3.60)
	Déplacement	$FC_{BcDep} = MS(0.00016MS^2 - 0.001968MS + 0.8496)$ (3.61)
	Attente	$FC_{BcAtt} = 3.71$ (3.62)
Camion	Balayage	$FC_{CaBal} = SS(0.0514SS^2 - 0.7676SS + 3.8222)$ (3.63)
	Déplacement	$FC_{CaDep} = MS(0.0001MS^2 - 0.0143MS + 0.8579)$ (3.64)
	Attente	$FC_{CaAtt} = 2.62$ (3.65)

Source : Ben Daya et al. (2024)

Notation

A : l'ensemble des arcs (i,j) servis et traversés

S_{ij} :temps de service de l'arc (i,j) exprimé en heure

t_{ij} :temps de traversé de l'arc (i,j) exprimé en heure

q: nombre de shifts total d'un plan de balayage

DtShifts: dureé d'un seul quart de travail exprimé en heure

fe: facteur d'émission (kg éq. CO_2 par litre de diesel)

cr: coût carbone ($ CA par kg éq. CO_2)

Modèle d'émissions de GES du système novateur en dollars

$$E_{SN1} = fe.cr\left(FC_{BalSN} + FC_{DepSN} + FC_{AttSN}\right) \quad (3.66)$$

L'équation (66) présente les émissions de GES du système novateur.

$$FC_{BalSN} = \sum_{(i,j)\in A} S_{ij}\left(FC(i,j)_{BnBal} + FC(i,j)_{BcBal} + 4\,FC(i,j)_{CaBal}\right) \quad (3.67)$$

L'équation (67) décrit la consommation de carburant à l'état de balayage du système novateur.

$$FC_{DepSN} = \sum_{(i,j)\in A} t_{ij}\left(FC(i,j)_{BnDep} + FC(i,j)_{BcDep} + 4\,FC(i,j)_{CaDep}\right) \quad (3.68)$$

L'équation (68) présente la consommation de carburant à l'état de déplacement du système novateur.

$$FC_{AttSN} = \left(FC_{BnAtt} + FC_{BcAtt} + 4\,FC_{CaAtt}\right) q.DtShifts * \frac{Att_{SN}}{(100 - Att_{SN})} \quad (3.69)$$

L'équation (69) décrit la consommation de carburant à l'état d'attente du système novateur.

Modèle d'émissions de GES du système classique en dollars

$$E_{SC1} = fe.cr\left(FC_{BalSC} + FC_{DepSC} + FC_{AttSC}\right) \tag{3.70}$$

L'équation (70) présente les émissions de GES du système classique.

$$FC_{BalSC} = \sum_{(i,j)\in A} S_{ij}\left(2\,FC(i,j)_{BcBal} + 4\,FC(i,j)_{CaBal}\right) \tag{3.71}$$

L'équation (71) décrit la consommation de carburant à l'état de balayage du système classique.

$$FC_{DepSC} = \sum_{(i,j)\in A} t_{ij}\left(2\,FC(i,j)_{BcDep} + 4\,FC(i,j)_{CaDep}\right) \tag{3.72}$$

L'équation (72) présente la consommation de carburant à l'état de déplacement du système classique.

$$FC_{AttSC} = \left(2\,FC_{BcAtt} + 4\,FC_{CaAtt}\right) q\,.\,DtShifts * \frac{Att_{SC}}{(100 - Att_{SC})} \tag{3.73}$$

L'équation (73) décrit la consommation de carburant à l'état d'attente du système classique.

QUATRIÈME CHAPITRE
ARTICLES DE LA THÈSE

Cette thèse a été rédigée selon le principe de l'insertion d'articles. Elle comprend trois articles dont l'auteure principale a assuré la conduite de la recherche, tandis que les coauteurs ont révisé les différentes versions.

Les références citées sont présentées à la fin de chaque article selon les normes de présentation de la thèse afin d'assurer une certaine cohérence dans la présentation. Les références citées dans les autres chapitres seront présentées à la fin de la thèse. Les annexe de chaque article se trouve à la fin de l'article également.

4.1. ARTICLE 1

Le premier article, intitulé « Adaptive large neighbourhood search for the multi-depot arc routing problem with flexible assignment of end depot and different arc types», est cosigné avec les professeurs Audy et Lamghari, et a été publié en novembre 2024 dans le journal *Journal of the Operational Research Society* (https://doi.org/10.1080/01605682.2024.2432605). La version insérée dans cette thèse est identique à celle publiée. Cet article est une extension de l'article de conférence Kraiem et al. (2025) dans lequel l'auteure principale a également assuré la conduite de la recherche. Le titre et le résumé en français du premier article sont indiqués ci-dessous.

Titre : Recherche adaptative à grand voisinage pour un problème de tournées sur arcs à dépôts multiples avec affectation flexible du dépôt de fin et prise en compte de différents types d'arcs.

Résumé : Cet article propose une approche avancée pour optimiser les opérations de balayage des rues, en s'appuyant sur une extension du problème de tournées sur arcs à dépôts multiples. L'une des principales contributions réside dans

l'introduction d'une affectation flexible du dépôt de fin, où les véhicules débutent et terminent chaque quart de travail à des dépôts déterminés. Une contrainte importante impose que chaque nouveau quart commence à partir du dépôt de fin du quart précédent. Le problème considère également des exigences opérationnelles spécifiques, notamment l'obligation de desservir les arcs autoroutiers exclusivement durant les quarts de nuit, tandis que les autres types d'arcs peuvent être traités de jour comme de nuit. L'objectif est de déterminer des quarts de travail optimaux respectant ces contraintes, ainsi que d'autres exigences telles que la durée maximale des quarts. Pour résoudre ce problème, un modèle de programmation linéaire en nombres entiers mixtes est formulé afin de minimiser à la fois le nombre de quarts de travail et le temps total de déplacement. Étant donné la complexité computationnelle des instances de grande taille, une métaheuristique de type recherche adaptative à grand voisinage est développée. Cette approche intègre des opérateurs spécifiques tenant compte des caractéristiques propres au problème, telles que le type d'arcs et l'affectation des dépôts, permettant ainsi un repositionnement efficace des arcs en fonction de leur type et de leur proximité aux dépôts. Les résultats numériques montrent que ces opérateurs spécifiques offrent de meilleures performances que les opérateurs classiques de la méthode, tant en termes de qualité des solutions que d'efficacité computationnelle. L'approche est évaluée sur des instances de grande taille ainsi que sur un cas réel, démontrant sa pertinence et sa robustesse.

ARTICLE 1: ADAPTIVE LARGE NEIGHBOURHOOD SEARCH FOR THE MULTI-DEPOT ARC ROUTING PROBLEM WITH FLEXIBLE ASSIGNMENT OF END DEPOT AND DIFFERENT ARC TYPES

Ameni Kraiem[a]*, Jean-François Audy[a,b] and Amina Lamghari[a,c]

[a]Department of Management, Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, QC G8Z 4M3, Canada; [b]Interuniversity Research Center on Enterprise Networks, Logistics and Transportation (CIRRELT), Montréal, QC H3T 1J4, Canada; [c]Group for Research in Decision Analysis (GERAD), Montréal, QC H3T 1N8, Canada

*Corresponding author: ameni.kraiem@uqtr.ca

Abstract

This article introduces an advanced solution to optimize street sweeping operations by extending a multi-depot arc routing problem. The key enhancement involves flexible end depot assignments, where vehicles start and conclude shifts at designated depots. A notable constraint requires subsequent shifts to begin from the destination depot of the preceding shift. The problem involves servicing highway exclusively during night shifts, while other arc types can be addressed during both day and night. The objective is to identify optimal shifts meeting practical criteria while adhering to constraints like maximum shift duration. To address this, a mixed-integer linear programming (MILP) model is presented. It aims to minimize the number of shifts and total travel time. Given the computational complexity of large instances, an adaptive large neighbourhood search (ALNS) metaheuristic was developed. This approach incorporates specialized operators that address unique attributes such as arc type and depot assignments, ensuring arcs are repositioned based on their type and proximity to depots. This tailored approach provides a distinct advantage over classical ALNS operators, as numerical tests indicate that the specialized operators are more efficient in comparison. The approach is evaluated on larger and a real-world instances, demonstrating notable performance in solution quality and computational efficiency.

Keywords: Multi-depot arc routing problem; flexible end depot; mixed integer linear programming; adaptive large neighbourhood search; street sweeping.

1. INTRODUCTION

In Northern countries with heavy snowfall, road maintenance operations are both costly and complex, involving activities such as snow removing, spreading abrasives and street sweeping. For example, in Quebec, 1.8 million tons of abrasives from mineral sources (such as sand, gravel and crushed stones) are spread annually on roads during the winter months (Mokhbi et al., 2017).

During the spring, street sweepers collect a portion of these abrasives to maintain road safety and the cleanliness of cities and towns. However, routing and scheduling for street sweepers pose significant challenges for service providers. Factors such as limited sweeper capacity, area size, cleaning frequency, time windows, and traffic patterns all need to be considered. That's why most of the service providers generate their schedules manually without the use of advanced technologies or optimization models (Delgado-Antequera et al., 2020; Strand et al., 2020). These service providers may rely on historical data and experience to determine their routes. Manual planning and scheduling are less efficient and cost-effective than using optimization models or advanced technologies, as it may not consider all the relevant factors that impact street sweeper operations. Generally, not all the service providers have the resources or the expertise to implement these advanced technologies and manual planning may be the only option for some (Negreiros et al., 2023). Manually scheduling the routes for sweepers is a highly time-consuming task that often leads to inefficient plans. Moreover, managing the sweeping of many arcs while satisfying multiple operational constraints and parameters simultaneously makes routing sweepers a challenging task.

Despite the crucial role of street sweeping for a clean environment, existing literature on street sweeper routing is limited (Yu et al., 2019). Challenges include operational complexities leading to reliance on unrealistic models, insufficient data and the overshadowing of street sweeping urgency by other transportation issues.

For street sweeping routing problems, there have been only two relevant studies on vehicle routing problems. Cerrone et al. (2014) addressed a mechanical street sweeping problem by creating a genetic algorithm (GA) that minimizes the total distance travelled by sweepers while complying with parking regulations and sweeping only one side of the road per day, within a given time constraint. Yurtseven and Gökçe (2019) developed a mathematical model to optimize routing for electric powered street sweepers, considering the heterogeneity of bin capacity and battery charging, with the goal of minimizing energy consumption. However, these street sweeping studies overlooked critical operational constraints. Specifically, these include the necessity to exclusively service certain arcs, such as highways, during night shifts to minimize disruptions caused by daytime traffic. This requirement stems from contractual obligations aimed at optimizing public safety and traffic flow.

Moreover, the operational setup involves multiple depots strategically positioned across the operational area. These depots function as essential hubs, facilitating seamless transitions for employees between day and night shifts without the need to return to a central base. This approach enhances operational efficiency by minimizing downtime and optimizing the deployment of sweeping resources. The flexible assignment of the end depot further enhances efficiency by allowing sweeping operations to end at any designated depot after completing a shift. This flexibility optimizes route planning and reduces travel distances compared to rigid, return-to-base approaches. As a result, street sweeping services can effectively cover larger areas in less time, meeting both contractual requirements and operational efficiency goals.

This article focuses on the Multi-Depot Arc Routing Problem (MDARP) with Flexible Assignment of End Depot (MDARPFED), a variant of the MDARP, where

the end depot for each shift is flexible. Notably, only four studies, to our knowledge, have addressed this variant. Kek et al. (2008) developed a MILP model for a distance-constrained capacitated vehicle routing problem, allowing flexible start and end depot assignments. However, scalability issues were noted for larger instances. Li et al. (2014) proposed a MILP model for the Multi Depot Vehicle Routing Problem (MDVRP) with time windows and flexible assignment of end depot and a hybrid genetic algorithm (HGA) with adaptive local search for efficient problem-solving. Markov et al. (2016) addressed a waste collection problem with fixed heterogeneous vehicles and flexible destination depot assignments, employing a MILP model and neighbourhood search heuristics for larger instances. In a recent study, Kraiem et al. (2023) developed a MILP model for the MDARPFED involving various arc types for street sweeping services. While this model was effectively solved for small instances using CPLEX, it was unable to handle real-world-sized instances within a reasonable time frame due to computational constraints. In the present article, we address this issue by employing the Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS) algorithm, which provides a feasible and efficient solution for larger instances. However, the literature on Multi Depot Arc Routing Problems (MDARP) remains sparse (Corberán et al., 2020; Fernández et al., 2017). As can be seen from Table 1, none of the listed studies proposed a heuristic or metaheuristic to solve the routing problem with flexible assignment of end depots and different arc types.

Table 1
Literature review on the MDARP

References	Problem type	Objective function	Methodology
Kraiem et al., (2023)	MDARPFED with different arc types	Minimize total travel time	MILP
Cao et al., (2021)	MDARP with heterogeneous fleet vehicle	Minimize total cost, makespan, carbon emissions and load utilization rate	Memetic algorithm

Wøhlk and Laporte (2018)	Large-scale CARP	Minimize total costs	Heuristic
Fernández et al., (2017)	MDARP	Minimize total costs	branch-and-cut algorithm
Fernández et al., (2016)	MDARP	Maximize total profit	branch-and-cut algorithm
Krushinsky and Van Woensel (2015)	MDCARP	Minimize total weight of all the tours	MILP and exact solution
Riquelme-Rodríguez et al., (2014)	Periodic CARP	Minimize total costs	Mathematical model

Cao et al. (2021) employed a memetic algorithm for MDARP with heterogeneous fleet vehicle constraints to minimize total cost, makespan, carbon emissions and load utilization rate. Fernández et al. (2017) introduced a branch-and-cut algorithm to solve MDARP on undirected graphs. Furthermore, Fernández et al. (2016) developed another branch-and-cut algorithm for a MDARP, tested on directed graphs. Krushinsky and Van Woensel (2015) proposed a mixed-integer linear programming formulation and an exact solution for the asymmetric Multi-Depot Capacitated Arc Routing Problem (MDCARP). While the MILP defines the structure of the problem, finding an exact solution means solving the MILP optimally, usually through algorithms like branch-and-bound, branch-and-cut, or using solvers like CPLEX. Also, Riquelme-Rodríguez et al. (2014) developed a mathematical model, which also uses a MILP approach, to solve a periodic capacitated arc routing problem, aiming to minimize total cost with inventory constraints. In this context, the mathematical model refers to the overall representation of the problem, with MILP being one specific type of model used. Wøhlk and Laporte (2018) developed a fast heuristic for large-scale capacitated arc routing problems for a waste collection application to minimize the total costs.

Moreover, several noteworthy studies have employed the ALNS algorithm to address various variants of the VRP (Cordeau et al., 2002; Gendreau et al., 2008;

Pisinger and Ropke, 2007; Ropke and Pisinger, 2006; Vidal et al., 2013). Liu et al. (2019) proposed an ALNS metaheuristic for the VRP with time windows and synchronized visits, complemented by a MILP model. Sacramento et al. (2019) developed a mathematical model for a VRP with a drone-delivery option, minimizing the total cost, and used ALNS for larger instances. In a similar vein, Lahyani et al. (2019) employed ALNS to solve a Multi-Depot Open Vehicle Routing Problem (MDOVRP), minimizing total distance with vehicles not obligated to return to depots. Additionally, Alinaghian and Shokouhi (2018) applied ALNS to solve a MDVRP with capacity and distance constraints, aiming to minimize total cost and distance. Mancini (2016) formulated a Multi Depot Multi Period Vehicle Routing Problem with a Heterogeneous Fleet (MDMPVRPHF) and an ALNS approach was proposed to minimize the total cost. Also, Quirion-Blais et al. (2015) developed an ALNS metaheuristic for a snow removal and abrasive spreading problem, minimizing makespan with various constraints. Azi et al. (2014) applied ALNS to a VRP with multiple routes, aiming to maximize the number of served customers. Moreover, Salazar-Aguilar et al. (2012) applied ALNS to solve an arc routing problem with vehicle synchronization constraints. Laporte et al. (2010) addressed a capacity-constrained arc routing problem using ALNS, yielding promising results. Ropke and Pisinger (2006) developed an ALNS metaheuristic for a VRPPDTW problem, considering capacity and time window constraints.

This study is primarily motivated by its practical application and new constraints having not yet been addressed so far in the literature. Additionally, the task of scheduling and planning routes is challenging due to the numerous parameters involved, coupled with these constraints. Moreover, the optimization problem for this real-world application is a complicated mathematical problem that falls under the classification of NP-hard, as the time taken grows exponentially with the number of arcs that require servicing and the necessity to develop a metaheuristic algorithm that is adapted to solve this VRP variant.

The present paper aims to address the research gap by proposing at first a novel MILP model to solve a MDARPFED with different arc types. The primary goal of this model is to minimize the number of shifts and total travel time. Second, an ALNS metaheuristic adapted to solve this problem is developed by proposing new operators for problem resolution on larger and real instances and help the service providers in planning and scheduling their street sweeping operations. The Adaptive Large Neighbourhood Search (ALNS) algorithm was chosen for its effectiveness, scalability and flexibility in solving NP-Hard problems with large instances (Lahyani et al., 2019; Laporte et al., 2010; H. Li et al., 2024; Liu et al., 2019; Mancini, 2016; Petropoulos et al., 2024; Sacramento et al., 2019; Tunalioğlu et al., 2016). Its adaptability, including tailored operators to handle complexities like flexible depot assignments and varying arc types, and its extensive application in VRP variants make it ideal for our study (Ropke and Pisinger, 2006). In addition, to accurately examine and illustrate the real-world constraints of the street sweeping problem and the challenging task of scheduling, we consider the problem as an arc routing problem and generate our own benchmark instances from Cordeau's MDVRP instances. The remainder of this article is organized as follows. Section 2 is devoted to the problem formulation. Section 3 focuses on the ALNS metaheuristic, which is described in detail and adapted to solve this MDARP variant. Section 4 presents and discusses the results from the numerical experiments, and Section 5 concludes and outlines directions for future research.

2. PROBLEM DESCRIPTION AND FORMULATION

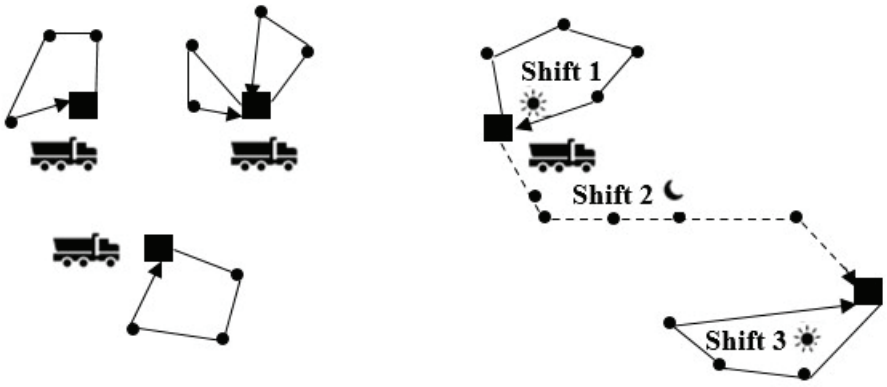
The process of selecting a service provider for street sweeping services involves a competitive tendering process, in which the preferred provider is identified based on his ability to offer the lowest price. In the tender process, the public authorities identify the specific requirements for the street sweeping services they need, including the distance of each segment to be swept, its time window, the area to be covered, the types of equipment required and the expected quality of service in a predetermined period. Prior to submitting their price offer, service providers are expected to estimate their

operational costs and time by planning and scheduling their street sweeping operations. Unfortunately, many service providers in the waste management industry, including those involved in street sweeping operations, still rely on manual scheduling methods and do not use decision support systems (Strand et al., 2020).

The MDARPFED involves optimizing the routing of a synchronized vehicle fleet across a network of arcs. The goal is to sweep all required arcs during allowed day/night shifts, minimizing the number of shifts and total travel time. Constraints include ensuring the fleet returns to a depot within the maximum work shift duration, starting each shift from the arrival depot of the previous one and allowing flexibility in the depot where a shift ends.

In the classical MDARP variant (Figure 1(a)), the fleet must return to the same depot after service completion. Conversely, the MDARPFED with different arc types (Figure 1(b)) allows flexibility in the depot where each shift concludes. As depicted in Figure 1, squares represent the depots, dashed lines represent the highway arcs while continuous lines represent the other types of arcs that can be serviced at both day and night shifts.

Figure 1
Comparison between classical MDARP and the MDARPFED with different arc types. (a) Classical MDARP (b) MDARPFED with different arc types



(a) Classical MDVRP (b) MDVRPFED with different arc types

The mathematical model proposed by Kraiem et al. (2023) takes the number of shifts q and positions k as fixed inputs, limiting its ability to optimize solutions with varying shift and position counts. Additionally, the model prematurely terminates a shift upon passing a depot, irrespective of the shift duration being considerably below the 12-hour limit. In contrast, the MILP in this article introduces a new decision variable, allowing flexibility by defining maximum numbers for shifts and positions, addressing the limitations of the previous model.

The MDARPFED with different arc types is defined on a directed graph $G = (V, A)$, where $V = \{1, \ldots n, n+1, \ldots n+m\}$ is the set of vertices and $A = \{(i, j) \mid i, j \in V; i \neq j\}$ is the set of all arcs (R, H and the rest of the arcs that serves to traverse between the arcs to be swept). R included in A presents only the arcs of type R which can be serviced at any shift. H included in A presents only the arcs of type H which should be serviced once only at night-shift. $D = \{n + 1, \ldots, n + m\}$ corresponds to the set of depots where n represents the number of nodes excluding depots and m is the number of depots. $Q = \{1, \ldots, c\}$ is the set of shifts where $q \in Q$ and c is the maximum number of shifts, and we assume that the first shift (q = 1) is a day shift. The duration of each shift must not exceed the maximum duration T = 12 hours. We define by Q_p the set of night shifts where $Q_p = \{2p;\ p \in N^*\}$. $K = \{0, \ldots, e\}$ is the set of arc positions where $k \in K$ and e is the maximum number of arcs in each shift. Only one vehicle exists since we consider all of them synchronized as one fleet.

Each arc $(i, j) \in A$ has two associated times, S_{ij} and t_{ij} for service and traversal without servicing, respectively. We define the number $M1$=12, which represents the maximum values of {S_ij, t_ij}. Both S_ij and t_ij are in hours. $M1$ allows constraints to be non-restrictive when the arc is not used, ensuring flexibility. Additionally, we define M=2.

We define the following decision variables:

X_{ijq}^{k} = {1 if (i, j) is traversed without being serviced in shift q at position k; 0, else}

Y_{ijq}^{k} = {1 if (i, j) is serviced in shift q at position k; 0, else}

w_q = {1 if shift q exists; 0, else}

U_{ijq}^{k} is the starting time of servicing or traversing (i, j) in shift q at position k.

f_q is the ending travel time in shift q.

The mathematical model of the MDARPFED with different arc types is formulated as MILP as follows:

$$\sum_{q \in Q} (12qw_q + f_q) \tag{1}$$

The objective function (1) minimizes the number of shifts and the total travel time. Here, w_q is a binary variable that equals 1 if shift q exists, and 0 otherwise. The term 12q represents the duration of shift q, with the coefficient 12 indicating the length of each shift in hours. Therefore, this part of the objective function minimizes the total duration across all shifts.

$$\sum_{q \in Q} \sum_{k \in K} Y_{ijq}^{k} = 1 \quad \forall (i, j) \in R \tag{2}$$

Constraints (2) guarantee that each arc of type R must be serviced once at any shift.

$$\sum_{q \in Q_p} \sum_{k \in K} Y_{ijq}^{k} = 1 \quad \forall (i, j) \in H \tag{3}$$

Constraints (3) guarantee that each arc of type H must be serviced once and only at a night shift.

$$Y_{ijq}^{k} = 0 \ \forall (i, j) \in A \setminus \{R, H\}, \forall k \in K, \forall q \in Q \tag{4}$$

Constraints (4) state that only the arcs of type *R* and *H* can be serviced.

$$\sum_{(i,j)\in A} (Y_{ijq}^k + X_{ijq}^k) \le 1 \quad \forall k \in K, \forall q \in Q \tag{5}$$

Constraints (5) ensure that for each shift there is only one arc in each position and this arc is either traversed without being serviced or serviced.

$$\sum_{i\in V} (Y_{ijq}^k + X_{ijq}^k) \ge 1 - M[1 - \sum_{h\in V} (Y_{jhq}^{k+1} + X_{jhq}^{k+1})] \ \forall j \in V \setminus D, \forall k \in K \setminus \{e-1\}, \forall q \in Q \tag{6}$$

$$\sum_{i\in V} (Y_{ijq}^k + X_{ijq}^k) \le \sum_{h\in V} (Y_{jhq}^{k+1} + X_{jhq}^{k+1}) \ \forall j \in V \setminus D, \forall k \in K \setminus \{e-1\}, \forall q \in Q \tag{7}$$

Constraints (6) and (7) ensure the flow conservation.

$$U_{ijq}^0 = 0 \quad \forall i, j \in V, \forall q \in Q \tag{8}$$

Constraints (8) state that the start time of traversing or servicing begins at a time equal to 0 in each shift.

$$w_q \ge Y_{ijq}^k + X_{ijq}^k \ \forall i, j \in V, \forall q \in Q, \forall k \in K \tag{9}$$

Constraints (9) state that an arc exists only if a shift exists.

$$\sum_{i\in D} \sum_{j\in V} (Y_{ijq}^0 + X_{ijq}^0) = w_q \ \forall q \in Q \tag{10}$$

Constraints (10) state that if a shift exists, then the arc in the first position should start from a depot.

$$(U_{ijq}^k + S_{ij}) - \sum_{h\in V} U_{jhq}^{k+1} \le M1(1 - Y_{ijq}^k) \ \forall i \in V, \forall j \in V \setminus D, \forall k \in K \setminus \{e-1\}, \forall q \in Q \tag{11}$$

$$(U_{ijq}^{k} + t_{ij}) - \sum_{h \in V} U_{jhq}^{k+1} \leq M1(1 - X_{ijq}^{k}) \forall i \in V, \forall j \in V \setminus D, \forall k \in K \setminus \{e-1\}, \forall q \in Q$$

(12)

Constraints (11) and (12) ensure that the start time of next arc is equal to current time plus service time or traversal time.

$$T(Y_{ijq}^{k} + X_{ijq}^{k}) \geq U_{ijq}^{k} \ \forall i \in V, \forall j \in V, \forall k \in K, \forall q \in Q \tag{13}$$

Constraints (13) ensure that if an arc is not serviced or traversed then the starting time is equal to 0.

$$U_{ijq}^{k} \leq T - S_{ij} Y_{ijq}^{k} \ \forall i \in V, \forall j \in D, \forall k \in K, \forall q \in Q \tag{14}$$

$$U_{ijq}^{k} \leq T - t_{ij} X_{ijq}^{k} \ \forall i \in V, \forall j \in D, \forall k \in K, \forall q \in Q \tag{15}$$

Constraints (14) and (15) ensure that the starting time from a node going to a depot plus the traversing or the service time should not exceed T hours.

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V} (X_{ijq}^{k} + Y_{ijq}^{k}) \geq \sum_{h \in V} (X_{jhq+1}^{0} + Y_{jhq+1}^{0}) \forall j \in D, \forall q \in Q \tag{16}$$

Constraints (16) ensure that the next shift should start from the depot where the previous shift ended.

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in D} \sum_{k \in K} (Y_{ijq}^{k} + X_{ijq}^{k}) \leq w_{q} \ \forall q \in Q \tag{17}$$

Constraints (17) ensure that if a shift exists then it should finish at only one depot.

$$f_{q} \geq U_{ijq}^{k} + t_{ij} X_{ijq}^{k} \ \forall i \in V, \forall j \in D, \forall k \in K, \forall q \in Q \tag{18}$$

$$f_q \geq U^k_{ijq} + S_{ij} Y^k_{ijq} \; \forall i \in V, \forall j \in D, \forall k \in K, \forall q \in Q \tag{19}$$

Constraints (18) and (19) indicate the ending travel time of each shift.

$$\sum_{i \in V} (X^k_{ijq} + Y^k_{ijq}) - \sum_{h \in V} (X^{k+1}_{jhq} + Y^{k+1}_{jhq}) \leq \sum_{d \in D} \sum_{i \in V} (X^k_{idq} + Y^k_{idq}) \; \forall j \in V, \forall k \in K \setminus \{e-1\}, \forall q \in Q \tag{20}$$

$$\sum_{h \in V} (X^{e-1}_{jhq} + Y^{e-1}_{jhq}) \leq \sum_{i \in V} \sum_{d \in D} (X^{e-1}_{idq} + Y^{e-1}_{idq}) \; \forall j \in V, \forall q \in Q \tag{21}$$

Constraints (20) and (21) ensure that the last node visited in a shift is a depot.

$$X^k_{ijq} \in \{0,1\} \; \forall (i,j) \in A, \forall k \in K, \forall q \in Q \tag{22}$$

$$Y^k_{ijq} \in \{0,1\} \; \forall (i,j) \in A, \forall k \in K, \forall q \in Q \tag{23}$$

$$U^k_{ijq} \geq 0 \; \forall (i,j) \in A, \forall k \in K, \forall q \in Q \tag{24}$$

$$f_q \geq 0 \; \forall q \in Q \tag{25}$$

$$w_q \geq 0 \; \forall q \in Q \tag{26}$$

Constraints (22) - (26) impose conditions on the decision variables.

3. ADAPTIVE LARGE NEIGHBOURHOOD SEARCH

The following sections 3.1-3.3 provide a comprehensive overview of the framework of our algorithm. Section 3.4 explains how to generate an initial solution and Section 3.5 describes the destroy/repair operators implemented to address the problem.

3.1. A framework of the metaheuristic algorithm

Ropke and Pisinger (2006) introduced ALNS, an extension of LNS, incorporating destroy and repair methods chosen based on statistical performance. Destroy methods remove parts of the solution, adding randomness for diverse exploration, while repair methods rebuild partial solutions, sometimes with stochastic elements to avoid repetition. The general ALNS framework (Algorithm 1) starts with an initial solution s_0, iterating until termination criteria is met. Uniquely, it reverts to the best solution obtained if a set number of iterations show no improvement (lines 14 to 20), as in Sacramento et al. (2019). Using weights assigned through roulette wheel selection (Section 3.3), an operator (a combined destroy/repair method) generates a neighbourhood solution *s'* in each iteration from the current solution *s*. Acceptance or rejection of *s'* follows the simulated annealing technique (Section 3.2).

Algorithm 1. ALNS algorithm

```
1: s ← InitialSolution() ;                    // Generate the initial solution
2: s* ⟵ s;                                    // Initialize the best solution as the initial solution
3: NoImpv ← 0;                                // Initialize the no improvement counter
4: while (Stop criterion is not met) do
                                              // Main loop until stop criterion is met
5:   For I iterations do                      // Perform I iterations for each segment
6:    choose a destroy/ repair operator using roulette wheel ;
                                              // Select an operator based on current weights
7:    if (Z(s′) < Z(s)) then                  // If the new solution is better
8:       s ⟵ s′;                              // Accept the new solution
9:       Update the score for the operator used with σ2;
                                              // Reward the operator (σ2 > 0)
10:      if (Z(s′) < Z(s*)) then              // If the new solution is the best so far
```

11: $s^* \leftarrow s'$; // Update the best solution
12: Update the score for the operator used with $\sigma 1$;
// Reward the operator more ($\sigma 1 > \sigma 2$)
13: $NoImpv \leftarrow 0$; // Reset no improvement counter
14: **else**
15: $NoImpv \leftarrow NoImpv + 1$; // Increment no improvement counter
16: **if** $(NoImpv > NoImpvMax)$ **then**
// If no improvement limit is reached
17: $s \leftarrow s^*$; // Revert to the best solution
18: $NoImpv \leftarrow 0$; // Reset no improvement counter
19: **end**
20: **end**
21: **else**
22: **if** $(\mathbf{exp}(Z(s) - Z(s')/T) > Random(0,1))$ **then**
// Apply simulated annealing acceptance criterion
23: $s \leftarrow s'$; // Accept the new solution probabilistically
24: Update the score for the operator used with $\sigma 3$;
// Reward the operator
25: **end**
26: **end**
27: Update the weights of all operators;
// Update the operator weights
28: end
29: Return s^* // Return the best-found solution

3.2. Acceptance criterion

To prevent the algorithm from randomly exploring the solution space, it is crucial to evaluate and accept the solutions generated by each destroy/repair operator.

To achieve this, the ALNS metaheuristic incorporates an acceptance criterion inspired by Simulated Annealing (SA) as proposed in (Ropke and Pisinger, 2006) (for SA refer to Černý (1985) and Kirkpatrick et al. (1983)). A temperature parameter T is utilized to govern the acceptance probability. A new solution s' is always accepted if $Z(s') \leq Z(s)$, where the objective value is denoted by $Z(s)$ and can be accepted with a probability function controlled with a parameter T if $Z(s')>Z(s)$. The probability function is calculated as $e^{-\Delta Z/T}$ with $\Delta Z = Z(s') - Z(s)$.

In our experiments, the starting temperature T_0 was set to $1.05 \times Z(s_0)$, where the initial solution s_0 is decreased after each iteration with the following formula $T \leftarrow cT$, where $0 < c < 1$ represents the cooling rate and was set to 0.99975 as suggested in (Ropke and Pisinger, 2006).

3.3. The adaptive mechanism

The ALNS applies an operator at each iteration on the current solution. Initially, the weights have the same probability and they are then updated iteratively taking into account a reaction factor γ between 0 and 1 as well as the performance score π_i of the respective operator i as suggested in (Ropke and Pisinger, 2006). A weight is associated with each operator for this purpose. For p operators, each with a weight $w_i, i = 1,..., p$, the operator j is selected with probability $w_j / \sum_{i=1}^{p} w_i,\ j = 1,..., p$. Starting with a unit weight for each operator, the weights are updated after a number I of consecutive iterations. The weights at the start of each segment *seg* are calculated as follows:

$$w_i^{seg} = (1-\gamma) w_i^{seg-1} + \gamma \pi_i^{seg-1} \tag{27}$$

, where π_i^{seg-1} is the score of the operator i at the end of segment *seg*-1. $\pi_i = S_i / U_i$ with S_i is the number of times the operator i has improved the quality of the solution

and U_i is the number of times the operator i has been selected. At the beginning, this score was reset to zero and then incremented when operator i is applied at a given iteration *iter* to generate a new solution. The new score at iteration $iter+1$ becomes:

$$\pi_i^{iter+1} = \pi_i^{iter} + \left\{ \begin{array}{c} \sigma_1: \\ \text{if a new best solution has been generated} \\ \sigma_2: \\ \text{if the generated solution is better than the current solution} \\ \sigma_3: \\ \text{if the generated solution is accepted but it is worse than the current solution} \\ \sigma_4: \\ \text{if the solution is rejected} \end{array} \right\} \quad (28)$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ and σ_4 are parameters. Parameter γ controls the inertia in the weight update equation. If γ is close to 0, the weights do not change much and if γ is close to 1, the update is driven by the most recent score.

3.4. Initial solution

An arbitrary solution can be used to initialize the ALNS algorithm. It is widely recognized that the quality of the initial solution does not significantly impact the overall performance of ALNS as long as it is allowed to run for a sufficient number of iterations (Barrena et al., 2014; Coelho et al., 2012; Lahyani et al., 2019; Pereira et al., 2015). As we do not permit exploration of infeasible solutions, the initial solution only needs to be feasible (Algorithm 2). We define by d_{start} the starting depot of first shift q=1 which is selected randomly from the depots list. The variable d is the nearest depot from last node visited in the initial solution s_0. In our implementation, each shift is built progressively looking for a random arc with the same type (*R* or *H*) as the first arc selected, added if a maximum duration (Value=10 hours) has not been exceeded. If the duration is exceeded, the last node visited returns to the nearest depot and a new shift (night shift) is initiated from the last visited depot and the process is repeated until all arcs have been visited. We assign odd numbers for the day shifts and even numbers for the night shift. We suppose that the first shift is a day shift. If the arcs with type *H* have

not been all visited yet, each night shift will start randomly from one of these arcs. Else, the arcs with type *R* will be visited in the night shift. We define by $t_{lastnode,i}$ the traversal time from last visited node to node i. We present below the pseudo code of the initial solution construction.

Algorithm 2. Initial solution

1: Initialize variables:
2: $q = 1$ // Starting shift index
3: last node= d_{start} // Last node visited (initially the starting depot)
4: $d_{start} = FunctionRandomDepot()$ // Select starting depot randomly from depots list
5: $d = FunctionNearestdepotFromLastNode()$
// Nearest depot from last node visited
6: Max duration = Value // Maximum duration for a shift
7: $s_0 \leftarrow d_{start}$ // Initial solution starts at the starting depot
8: q_p : the set of night shifts where $q_p = \{2p;\ p \in N^*\}$ // Set of night shifts
9: **While** $(R \cup H \neq \emptyset)$ **do** // Repeat until all arcs are visited
10: **If** $\left(q \notin q_p\right)$ **then** // If current shift is a day shift
11: Select a random arc $(i, j) \in R$
// Select random arc of type R
12: $Max\ duration \leftarrow Max\ duration\ - t_{lastnode\,i} + S_{ij}$
// Update remaining duration
13: **If** (Max duration < 0) **then** // If duration exceeded
14: $s_0 \leftarrow s_0 + d$ // Add depot to solution
15: $q = q + 1$ // Start new shift
16: $lastnode \leftarrow d$ // Reset last node to depot
17: **else**
18: $s_0 \leftarrow s_0 + (i, j)$ // Add arc to solution
19: $lastnode \leftarrow j$ // Update last node visited
20: Delete (i, j) from R // Remove arc from set
21: **end**
22: **else**
23: **If** $(q \in q_p)$ **then** // If current shift is a night shift
24: **If** $(H \neq \emptyset)$ **then** // If there are unvisited arcs of type H
25: Select a random arc $(i, j) \in H$
// Select random arc of type H
26: **else**
27: Select a random arc $(i, j) \in R$
// Select random arc of type R

```
28:          end
29:          Max duration ← Max duration − t_lastnode i + S_ij
                                        // Update remaining duration
30:          If (Max duration < 0) then
                                        // If duration exceeded
31:              s_0 ← s_0 + d          // Add depot to solution
32:              q = q + 1              // Start new shift
33:              lastnode ← d           // Reset last node to depot
34:          else
35:              s_0 ← s_0 + (i, j)     // Add arc to solution
36:              lastnode ← j           // Update last node visited
37:              if ( (i, j) ∈ H ) then
38:                  Delete (i, j) from H // Remove arc from set H
39:              else
40:                  Delete (i, j) from R // Remove arc from set R
41:              end
42:          end
43:      end
44:  end
45: end
```

3.5. The operators

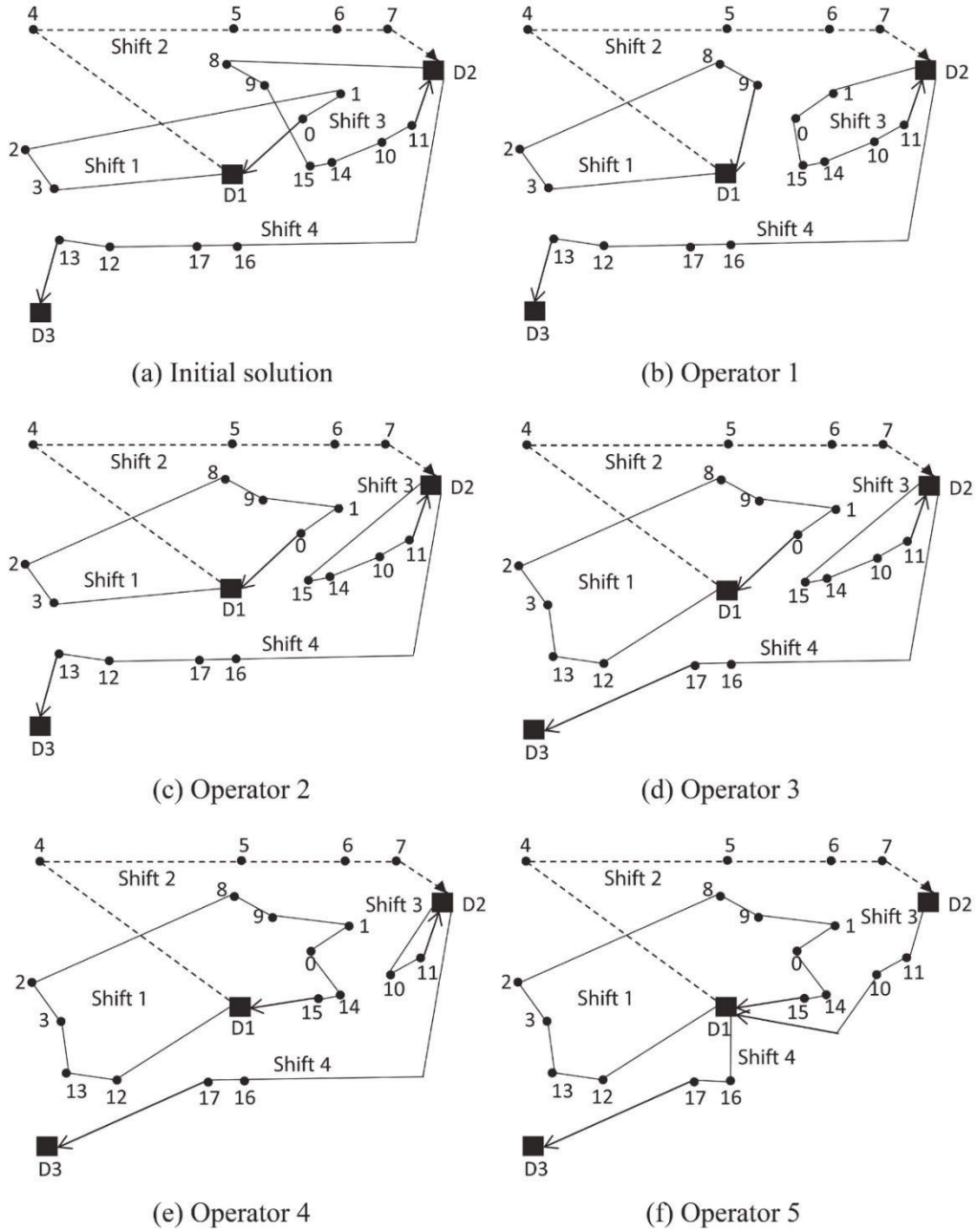
We have developed five destroy/repair operators. For each of them, the insertion of the removed arc is allowed if and only if the maximum shift duration is not exceeded. Additionally, if the arc type is *H* it can be inserted only in a night shift. The destroy/repair operators are described below. Considering this example of initial solution in Figure 2(a), we apply each operator consecutively to give more comprehensive description of the performance of the operators. The arcs (4,5) and (6,7) are of type *H* (dashed lines) while the rest of the arcs are of type *R* (solid lines).

- O1: Type oriented removal-interchange of arcs (Shaw removal)

This operator presented in Figure 2(b) consists of randomly selecting two arcs with the same type, either R or H from random shifts and interchanging their order of service. The goal of this destroy/repair operator is to diversify the search. Initially the arc (0,1) was serviced at shift 1 while the arc (8,9) was serviced at shift 3. After

applying operator O1, the order of service of these two arcs with the same type *R* was interchanged. Arc (8,9) is serviced at shift 1 while arc (0,1) is serviced at shift 3.

Figure 2
Example of application of the operators. (a) Initial solution (b) Operator 1 (c) Operator 2 (d) Operator 3 (e) Operator 4 (f) Operator 5



- O2: Random arc removal-Random insertion

This operator presented in Figure 2(c) consists of randomly removing an arc to be serviced from any shift excluding the last and inserting it into a random position of another shift (excluding the last). If the removed arc has the type *H* it can be inserted only in a night shift. This destroy/repair operator attempts to diversify the search.

As presented in Figure 2(b), the arc (0,1) has been selected randomly from shift 3 then inserted into a random position in shift 1 (Figure 2(c)) after applying operator O2.

- O3: Best arc removal- Closest insertion

The aim of this destroy/repair operator presented in Figure 2(d) is to minimize the number of shifts and the total travel time. It consists of removing an arc to be serviced from the last shift and inserting it into a shift, namely the one that includes the closest node to the removed arc in the current partial solution while considering the type of the removed arc.

Operator O3 has selected the arc (12,13) from the last shift (shift 4) (Figure 2(c)) and inserted it in shift 1 (Figure 2(d)). Given that the objective of this problem is to minimize the number of shifts and the total travel time, this operator can play a significant role in enhancing the current solution.

- O4: Random arc removal- Closest insertion

This destroy/repair operator presented in Figure 2(e) consists of randomly removing an arc to be serviced from any shift excluding the last and inserting it into its closest position of another shift (excluding the last). If the removed arc has the type *H* it can be inserted only in a night shift.

After applying operator 4, the arc (14,15) was removed from shift 3 (Figure 2(d)) and inserted in shift 1 after the arc (1,0) (Figure 2(e)).

- O5: Random depot removal-Random depot change

This destroy/repair operator presented in Figure 2(f) consists of randomly selecting the arrival depot of a shift and the starting depot of the next shift, which are the same because each shift must start from the last depot visited. Then, the operator replaces the selected depot by a random depot.

The fleet of vehicles completed servicing shift 3 at depot D2 and commenced servicing shift 4 from the same depot (as shown in Figure 2(e)). After applying operator 5, the depot was switched from D2 to D1 (as depicted in Figure 2(f)) because it minimizes travel time and, consequently, reduces the end time of service in shift 4.

The developed operators bring a unique contribution to the optimization process by being meticulously tailored to address the unique characteristics and constraints of our specific problem domain. In contrast, classical ALNS operators have a broader application in various optimization scenarios. Our operators consider specific attributes such as arc type and depot assignments, finely attuned to the unique characteristics of our problem. This ensures solutions are not only theoretically performant but also practically actionable in a managerial context. What sets our operators apart is their dual nature, seamlessly combining destructive and constructive actions in a single step, facilitating exploration of new and potentially superior solutions. Despite nuanced differences, both sets of operators share fundamental similarities, employing a diverse set of exploration techniques, including intensification for refining and optimizing the current solution and diversification for exploring a wide solution range, enabling a comprehensive search of the solution space.

4. COMPUTATIONAL RESULTS

The ALNS metaheuristic was implemented in C++ and run on an AMD Ryzen 7 7840HS with Radeon 780M Graphics, 3.80 GHz, and 16 GB of RAM. The mathematical model presented in Section 2 was solved using the IBM ILOG CPLEX

20.1.0 solver and its Python API and implemented on the same computer model. The results are presented in Section 4.2. Next, we compared the performance of CPLEX and ALNS on the same small/medium-sized instances. Furthermore, we evaluated the performance of our ALNS algorithm on real data and larger random instances, as well as larger modified instances derived from Cordeau's MDVRP instances. Various scenarios were tested, and the results are presented in Section 4.3.

4.1. Parameter setting

A systematic tuning approach was used (Kancharla and Ramadurai, 2020; Ulsrud et al., 2022) where we have tested the 50 and 200 node instances with five values of maximum iterations (5000, 10000, 15000, 20000, 25000), three values of segment iterations I (50, 100, 120), three values of maximum number without any improvement $NoImpvMax$ (20, 50, 80) and three values of c (0.95, 0.98, 0.99975) for a total of 135 combination. These combinations were ranked based on the average solution obtained for the tested instances. In cases where combinations yielded the same average solution, the ranking was further refined based on run times. The final combination that produced the best results was retained, and these were maximum iterations=20000, I=100, $NoImpvMax$=50 and c=0.99975. The remaining parameters are taken from literature (e.g.,Quirion-Blais et al., 2015; Ropke and Pisinger, 2006) and are as follows: $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4) = (33, 9, 13, 0)$. The notation follows Ropke and Pisinger (2006).

4.2. Experiments with small/medium instances

Since the MDARPFED with different arc types has not been previously addressed in the literature, we had no existing benchmark instances to reference. To address this gap, we used the largest instance (Pr06 with 292 nodes) with two depots (m=2) from the ten large MDVRP instances provided by Cordeau, available at http://neumann.hec.ca/chairedistributique/data/mdvrp/new. From this instance, we

created our benchmark set by generating arcs instead of nodes to allow solving an arc routing problem. We developed nine sets of instances with varying node sizes (8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22 and 24) including two depots. Each set includes five instances, totalling 45 instances. The detailed process for generating these instances is described in Kraiem et al. (2023). To create our benchmark instances with arcs from Cordeau's MDVRP instances with nodes, we followed a multi-step process:

- **Linear Function Generation**: We generated highway arcs by defining linear functions of the form y=ax+b, with intercept b within the range of the grid dimension and slopes between −30 and 30. Margins were added to include nodes within a specific range, ensuring enough linear nodes to construct arcs of type H.

- **Random Node Selection**: We randomly selected nodes to classify as type H or type R, ensuring that the number of nodes of type R is greater than the number of nodes of type H. For type H, nodes were selected based on their alignment with the linear functions and their margins. For type R, nodes were selected randomly from the remaining nodes.

- **Node Duplication and Arc Length Assignment**: For each selected node, a second node was generated to form the required arcs. Arc lengths were assigned based on a normal distribution derived from tendering documents, with lengths ranging from 0.1 km to 7 km. The slope of type H arcs matched the selected linear function, while the slope of type R arcs was randomly generated.

- **Node Adjacency and Arc Generation**: For each pair of selected and generated nodes of type H, one arc was generated. For type R nodes, two arcs were generated in both directions. The direction of type H arcs depended on their position relative to the linear function and margins.

This process transformed Cordeau's MDVRP nodes into practical, arc-based instances tailored for street sweeping operations, providing a realistic and challenging set of benchmark instances. The average vehicle speed for servicing was established following the research conducted by Daya et al. (2022), where they examined the performance of a mechanical sweeping system. In our research, we configured the average vehicle traversing speed to be 15 km/h and the average servicing speed was set at 5 km/h. Using these average speeds and the lengths of the arcs obtained from a normal distribution, we were able to calculate the service and traversing times for each arc. Results in Table 2 show optimal total travel time (VAL(h)) and execution times (CPU(s)). The last column gives the percentage deviation, which is calculated as $Dev_{VAL(\%)} = (VAL(ALNS) - VAL(CPLEX)) / VAL(CPLEX)$, between the solutions found by ALNS and the best value returned by CPLEX. Bold indicates optimal solutions. The metaheuristic was run 30 times for each instance and the average total travel time values (VAL(h)) and execution time (CPU(s)) were reported. It consistently achieves optimality when CPLEX proves this result. For n≥16, ALNS is faster than CPLEX. In instances with 24 nodes, CPLEX fails within the time limit. Thus, CPLEX struggles with larger instances, while ALNS performs well. Further sections test ALNS on larger instances and a real case study.

Table 2
Comparison of CPLEX and ALNS results

Instance size (n)	***m***	**CPLEX**		**ALNS**		**Dev_{VAL}(%)**
		VAL(h)	CPU(s)	VAL(h)	CPU(s)	
8	2	**6.63**	0.51	**6.63**	1.60	0
10	2	**8.63**	1.55	**8.63**	1.79	0
12	2	**10.04**	7.02	**10.04**	3.54	0
14	2	**12.69**	8.72	**12.69**	3.87	0
16	2	**14.22**	15.23	**14.22**	4.07	0
18	2	**15.92**	200.42	**15.92**	5.18	0
20	2	**16.11**	292.75	**16.11**	5.89	0
22	2	**17.42**	459.34	**17.42**	6.11	0
24	2	18.23	7200	**18.20**	6.67	-0.16

4.3. Experiments with larger instances

In this section, we began by evaluating the effectiveness of the different destroy/repair operators. Following this, we examined accepted solutions at each iteration and tracked the best solution found thus far. This dual approach allowed us to assess the performance of the ALNS algorithm comprehensively.

Next, we examined the effects of varying the number of depots and the types of arcs on solution quality and CPU time. Finally, ALNS was carried out over real-life instance and computational results are presented below.

4.3.1. Contribution of operators

Next, we generated four sets of instances with several nodes equal to 54, 104, 154, and 204 including 4 depots distributed on a grid of dimensions 200x200 km. Additionally, another four sets of instances with several nodes equal to 130, 172, and 228, including 4 depots, were generated from Cordeau's MDVRP instances. Table 3 presents the various specifications of the parameters used in constructing the benchmark instances.

For all the instances, we followed the multi-step process detailed in Kraiem et al. (2023) and summarized in previous section. Five instances were generated for each set and in total we have 35 instances.

The ALNS metaheuristic was applied 30 times to each instance and the average total travel time values (*VAL(h)*) and execution times (*CPU(s)*) were reported.

Table 3
Parameters of the benchmark instances

Parameters	Specifications
Proportion between different arc types	30% of arcs are classified as type H. 70% of arcs are classified as type R.
Maximum number of arcs in each shift	The number of arcs in each shift changes from instance to another depending on the service time of each arc and the traverse time between the arcs to be serviced. The duration of each shift should not exceed 12 hours.
Node position generation and distribution	• For instances sourced from Cordeau's data, each existing node is complemented by a second node, generated based on the normal distribution of arc lengths ranging from 0.1 km to 7 km. • In randomly generated instances, initial nodes are randomly positioned on a 200x200 km grid. Subsequently, second nodes are generated using the same normal distribution of arc lengths employed for Cordeau's instances. This approach presented by Kraiem et al. (2023) ensures that both the sourced and randomly generated instances maintain a consistent method for determining arc lengths and node placements, essential for simulating realistic conditions in our optimization studies.

Next, our focus is directed towards the dynamic generation of weights for the five operators in every iteration of the optimization process. These weights play a pivotal role in guiding the behaviour of each operator as the algorithm progresses. Figure A1 in the appendix presents the computational performance of all operators.

We analysed accepted solutions and tracked the best solution found so far. Figure A2 in the appendix presents these values for each iteration in the optimization process, showcasing results for two instances with n=50 nodes (Figure A2(a)) and n=200 nodes (Figure A2(b)).

Next, we conducted an extensive analysis to verify the contribution of each operator to the overall performance of the algorithm. Specifically, we implemented five variants of the proposed ALNS algorithm, each excluding one of the operators, which we have named ALNS-Oi, where Oi is the algorithm without the operator Oi (i = 1, 2, ..., 5). The results of these comparisons are presented in Table 4. The table provides detailed insights into the performance differences between the ALNS-Oi variants and the original ALNS algorithm with all operators included.

Table 4
Performance of each operator

		ALNS-O1		ALNS-O2		ALNS-O3		ALNS-O4		ALNS-O5		ALNS (O1-O5)	
Instance size (n)	*m*	VAL (h)	CPU (s)	VAL (h)	CPU (s)	VAL (h)	CPU (s)	VAL (h)	CPU (s)	VAL (h)	CPU (s)	VAL (h)	CPU (s)
50	4	100.31	36.60	107.22	44.17	119.21	50.51	102.74	41.43	105.26	45.98	98.64	36.42
100	4	188.02	80.69	210.22	109.28	227.84	153.14	193.42	117.00	200.28	126.64	187.41	93.88
130	4	214.93	164.52	222.48	159.24	230.45	162.78	228.88	118.40	233.02	135.96	212.05	172.17
150	4	267.81	170.70	314.92	165.01	301.97	170.49	290.65	126.84	307.05	147.76	280.28	185.14
172	4	279.30	178.21	315.29	174.60	316.13	179.93	299.22	133.33	314.29	150.71	289.90	190.63
200	4	370.26	180.20	407.60	226.64	534.73	295.43	383.49	165.02	394.06	203.09	369.49	206.59
228	4	405.21	301.27	428.04	341.38	432.55	375.77	423.78	333.96	426.42	334.63	400.77	350.02

ALNS with all operators (O1-O5) consistently achieved the lowest objective values (VAL) and competitive CPU times across all instance sizes, indicating superior overall performance. Operators O3, O2, and O5 were particularly crucial, as their removal resulted in significant increases in both VAL and CPU times. This can be attributed to the fact that while O1 and O2 aim to diversify the neighbourhood solution

search space, O3 and O4 were constructed to minimize the number of shifts and total travel time. Moreover, operator O5 was designed to provide more flexibility in assigning destination depots for shifts. These focused operators towards specific constraints provide valuable managerial insights. They facilitate the customization of solutions that closely align with the nuanced aspects of our real-world operations. This, in turn, results in efficiency improvements by optimizing travel time and minimizing the number of shifts required.

To ensure the robustness and statistical significance of our results, we applied the Wilcoxon signed-rank test with $\alpha=0.05$. This non-parametric test was chosen due to its suitability for comparing paired samples and its ability to handle non-normal distributions. We tested these five variants on a reduced set of instances (n=228, 150 and 50 nodes) with various characteristics to capture a broad spectrum of problem scenarios. The results are presented in Tables A3-A6 in the appendix. Our analysis confirms that each operator contributes uniquely to the optimization process, with O3 being the most critical, followed by O2, O5, O4, and O1. The ALNS algorithm with all operators applied demonstrates the best performance, validating the contribution of each operator.

4.3.2. Impact of depots number variation

We have explored the impact of varying the number of depots, specifically comparing scenarios with 2 depots versus 4 depots, on both solution quality and CPU time. This exploration is crucial because the choice of the number of depots can significantly affect the overall efficiency and effectiveness of the solution in various contexts. ALNS has been applied 30 times to the generated instances, altering the number of depots to 2. Table 5 presents a comprehensive summary of the comparative analysis between using 2 and 4 depots. The primary focus of this analysis was to evaluate the effects on both solution quality (VAL(h)) and CPU time (s), aiming to gain deeper insights into how the number of depots influences the efficacy of our approach.

Table 5
Impact of depots number variation

Instance size (n)	*m*	VAL(h)	CPU(s)
50	2	114.14	51.33
	4	98.64	36.42
100	2	201.25	111.45
	4	187.41	93.88
130	2	231.60	165.10
	4	212.05	172.17
150	2	285.12	189.12
	4	280.28	185.14
172	2	320.81	202.32
	4	289.90	190.63
200	2	380.55	220.48
	4	369.49	206.59
228	2	446.07	369.36
	4	400.77	350.02

Across all instances, scenarios with 4 depots consistently yield lower solution values than scenarios with only 2 depots, suggesting that a higher number of depots can enhance solution quality. For instance, in the 50-node scenario, the solution value improves significantly from 114.14 h with two depots to 98.64 h with four depots. As the number of nodes increases, both solution values and CPU times generally grow due to the increased complexity of the problem.

In summary, a greater number of depots provide enhanced flexibility for ALNS, allowing exploration of a broader solution space and seeking configurations with reduced traversing times. Increasing the number of depots can be a valuable strategy for improving ALNS performance, especially when flexible end depot assignment and minimizing traversing times are crucial optimization factors.

Increasing the number of depots in street sweeping operations has notable managerial implications. Depots, in this context, function as operational hubs, facilitating seamless employee transitions between day and night shifts. This strategic decision holds significance, especially given the seasonal nature of operations concentrated over a few days in spring. The choice of the number and placement of

depots significantly influences fleet efficiency, operational costs, traversing times and employee scheduling. Flexible assignment of end depots enables more efficient route coverage, reducing traversing times compared to scenarios with a single depot or a return-to-base approach.

4.3.3. Impact of variation in arc types

In real street sweeping contracts, the variation in route types is influenced by geographic location. Some contracts predominantly involve highway and rural routes, while others focus mainly on urban routes. This variation impacts how routes are planned and navigated. We have reflected these differences in the generated instances to accurately represent the diversity in route compositions. The proportion of arcs varies based on the awarded contract. Exploring the impact of such variations, we analyse four cases with different arc type distributions:
Case 1: 30% of arcs are classified as type *H*.
Case 2: 20% of arcs are classified as type *H*.
Case 3: 10% of arcs are classified as type *H*.
Case 4: 100% of arcs are classified as type *R*.

Case 1 starts with 30% of arcs classified as type H. In Case 2, this proportion decreases to 20% as 10% of arcs originally classified as type H are randomly changed to type R. Similarly, in Case 3, only 10% of arcs remain classified as type H after another 10% are converted to type R. Finally, Case 4 consists entirely of arcs classified as type R, indicating a scenario where no arcs are designated as type H. This progression highlights a gradual shift from a significant presence of type H arcs to a complete absence, reflecting varying configurations of arc types through iterative adjustments.

Table 6 displays ALNS results on benchmark instances with 2 and 4 depots, emphasizing solution quality and computational time. Systematically exploring these

variations aims to unveil how arc type distribution influences ALNS performance in terms of solution quality and computational efficiency.

Table 6
Impact of variation in arc types

		Case 1		Case 2		Case 3		Case 4	
Instance size (n)	*m*	VAL(h)	CPU(s)	VAL(h)	CPU(s)	VAL(h)	CPU(s)	VAL(h)	CPU(s)
50	2	114.14	51.33	113.21	56.13	112.34	60.99	110.26	32.17
	4	98.64	36.42	98.00	49.24	97.92	81.26	96.62	35.67
100	2	201.25	111.45	200.11	120.14	195.47	122.41	180.41	111.45
	4	187.41	93.88	185.65	95.47	183.65	99.65	170.14	100.47
130	2	231.60	165.10	229.42	130.01	227.16	146.12	226.75	149.76
	4	212.05	172.17	210.14	177.12	205.56	168.14	192.62	180.22
150	2	285.12	189.12	283.11	195.14	280.74	198.25	271.42	200.62
	4	280.28	185.14	278.12	188.46	275.18	190.14	262.47	192.14
172	2	320.81	202.32	313.60	278.28	312.84	286.41	294.58	258.55
	4	289.90	190.63	275.83	226.91	274.89	269.13	259.14	259.27
200	2	380.55	220.48	376.14	222.15	372.45	225.65	367.23	228.69
	4	369.49	206.59	365.47	210.56	360.14	213.56	351.85	211.54
228	2	446.07	369.36	439.12	333.35	424.78	314.81	393.49	335.82
	4	400.77	350.02	397.29	371.21	396.71	369.50	358.64	359.38

In examining the four cases with varying percentages of type *H*, first we observe that as we progress from Case 1 (with 30% of arcs classified as *H*) to Case 4 (with 100% of arcs classified as *R*) a reduction in the presence of highway arcs tends to correlate with an improvement in solution quality, as indicated by the decrease in *VAL(h)*. This suggests that minimizing highway arcs results in enhanced solution quality across instances with 2 and 4 depots. The underlying reason is that the problem becomes subject to fewer scheduling constraints, which provides greater flexibility in assigning tasks between day and night shifts for the same work (i.e., distance to be covered). Furthermore, the CPU times remain relatively stable throughout these transitions, implying that the algorithm effectively manages computational time, whether highway arcs are present or not. This adaptability showcases the resilience of the algorithm in addressing complex scenarios while consistently striving to provide optimal solutions.

Without the constraints imposed by the highway arcs, the algorithm can destroy and repair the solution more optimally across the day and night shifts. Consequently, it minimizes the waiting and non-productive time during the transition from the night to the day shift, especially when highway arcs would typically require night servicing. The ability of ALNS to seamlessly adjust to this complexity ensures that the transition from night to day shift remains efficient and productive, despite the challenges posed by highway arcs. The main idea is that the algorithm can adapt smoothly and effectively to complex scenarios, such as the one represented in Case 1 with highway arcs. This enables the maintenance of an efficient transition from the night shift to the day shift, even in the presence of these highway arcs, which may introduce additional challenges.

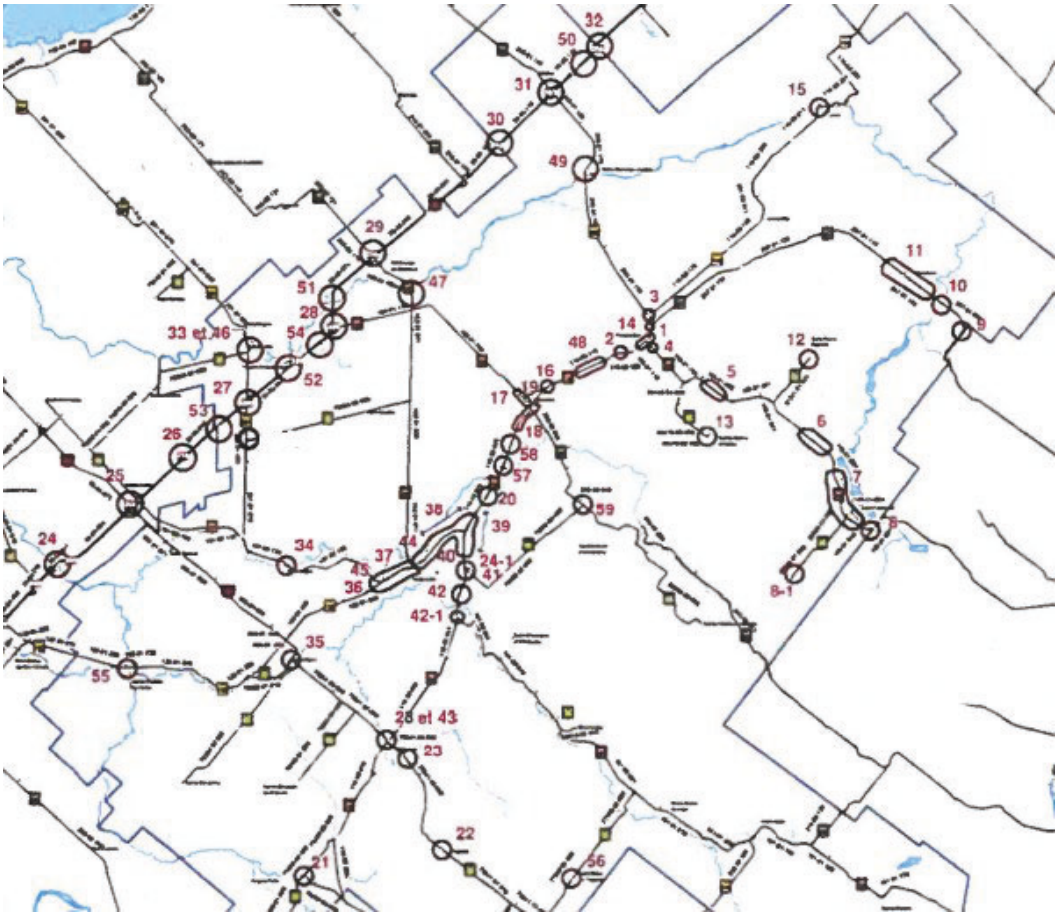
Studying the variation in arc types holds crucial managerial implications for the service provider in street sweeping operations. By recognizing that highway arcs necessitate night servicing, the service provider can strategically allocate resources and schedule shifts accordingly. This not only minimizes downtime but also maximizes the productive use of resources during these critical transition periods.

Additionally, understanding this variation allows the service provider to optimize workforce allocation, ensuring that the vehicles and the personnel are available when and where they are needed most.

4.3.4. Real case study

Since the routing problem studied in this article originates from a real-world application, we now apply CPLEX and ALNS metaheuristic to real case study obtained from the service provider. This real case study focuses on the city of Victoriaville in Quebec, Canada. According to the contract published by the public authorities, the total distance that needs to be swept is 165 kilometres, comprising 144.5 km of type *R* and 20.5 km of type *H*. Figure 3 provides a visual representation of the road network of the city, encompassing 198 nodes with a number m of depots equal to 4 (presented in squares). The arcs to be serviced are circled.

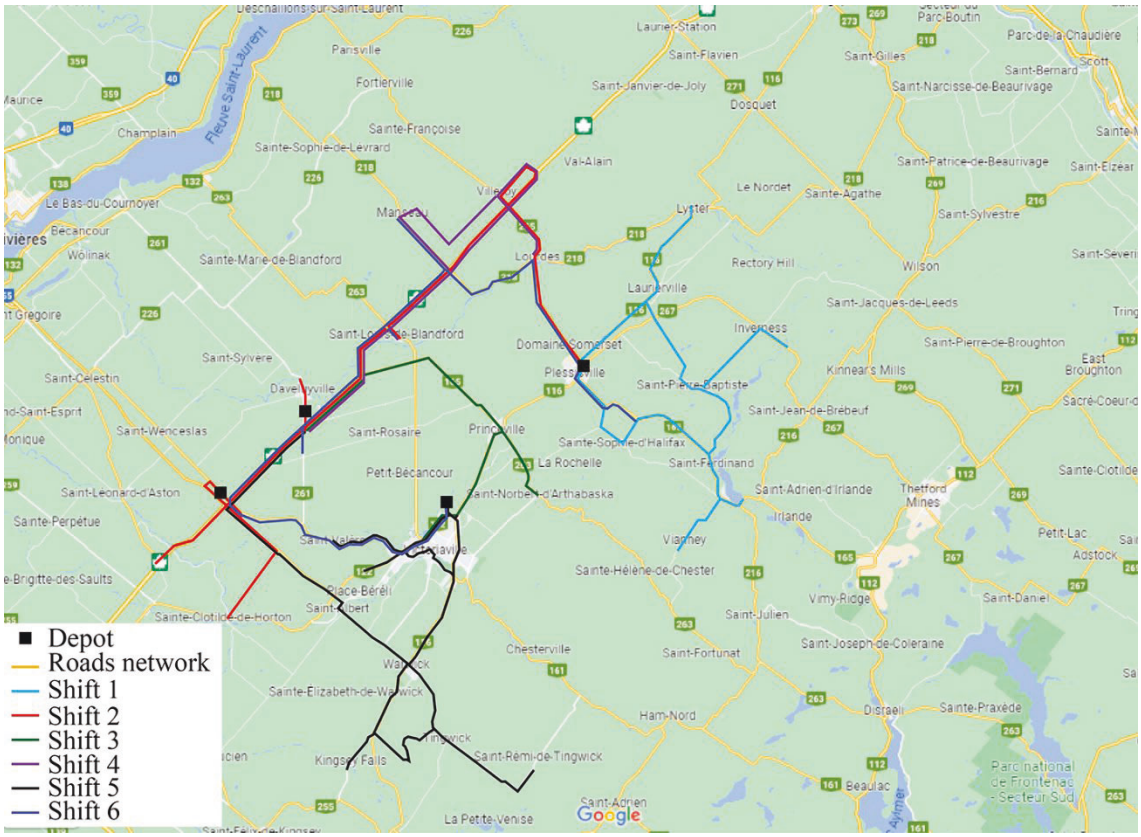
Figure 3
Street network of Victoriaville



The data provided by the public authorities contains general addresses of the required arcs and needs to be converted into usable data for optimization. To transform these general addresses into actionable data, a multi-step process was initiated. First, the provided addresses were processed to extract precise geographical coordinates (x, y) using the Google Maps platform. This step ensured that the locations were accurately represented in spatial terms. Subsequently, a VBA (Visual Basic for Applications) code was developed, acting as a bridge between Excel and the Google Maps API. This code, linked with an API key, enabled Excel to send requests to the API and retrieve vital information, such as distances and travel times between nodes. The data obtained from this process was then populated into an Excel worksheet, creating a dataset that forms

the foundation for further optimization and analysis. In our experiments, service time S_{ij} was computed based on an average vehicle servicing speed of 5 km/h, while travel time t_{ij} was obtained using Google Maps through the VBA code. Initially, we applied the CPLEX solver to the dataset. Despite a 24-hour time limit, no solution was found, attributed to the complexity of the problem and the extensive instance size. We then relaxed binary variables to continuous, noting the achieved lower bound within the 24-hour limit, amounting to 0.71 hours. Subsequently, ALNS was applied to the data, generating a set of shifts (Figure 4) with a total travel time of 44 hours and 7 minutes in just 94.60 seconds. The notable difference between the continuous relaxation lower bound and ALNS results emphasizes the effectiveness of employing metaheuristic approaches, especially for larger instances, where metaheuristics offer high-quality solutions within reasonable timeframes.

Figure 4
Routes optimization



5. CONCLUSION AND FUTURE WORK

The comprehensive evaluation of the flexible end depot assignment approach within the context of multi-depot arc routing for street sweeping, employing the adaptive large neighbourhood search algorithm, showcased remarkable operational enhancements. ALNS demonstrated adaptability to varying depot numbers and arc types, consistently delivering high-quality solutions across diverse scenarios. Its efficacy in optimizing operational parameters, such as the number of depots, reflects its versatility. The incorporation of different arc types, including strategic handling of highways during night shifts, underscores the flexibility of ALNS in managing diverse contracts.

The numerical results indicate that the ALNS algorithm, incorporating tailored operators (O3, O4, and O5), is more efficient than that incorporating only classical operators (O1 and O2) in solving MDARPFED. Operators O3, O4, and O5, designed to handle specific constraints such as arc type and flexible end depot assignments, consistently outperform classical operators (O1 and O2) across all instance sizes. This highlights the tailored approach of our algorithm to address real-world complexities effectively. Despite this improvement in solution quality, the computational efficiency (CPU time) remains competitive, demonstrating the algorithm's robust scalability and suitability for large size applications. Overall, the ALNS framework proves robust and adaptable, successfully balancing exploration and exploitation to tackle such complex routing problem. In contrast, CPLEX faced limitations in handling larger instances. For example, while CPLEX managed to solve instances up to 24 nodes within 7200 seconds, it struggled with longer computational times as instance sizes increased, showing limits in scalability and efficiency. In comparison, ALNS achieved comparable solution quality with shorter CPU times, particularly in larger instances, showcasing its robust performance and adaptability in practical scenarios.

The successful application of the ALNS algorithm in this study holds also several noteworthy managerial implications. Firstly, it offers the service provider a

practical and effective tool for optimizing street sweeping operations. The flexibility in end depot assignments allows for more agile and responsive scheduling, aligning operations with specific needs and constraints. Furthermore, the ability to differentiate arc types, particularly the exclusive servicing of highways during night shifts, represents a strategic advantage. This feature enables service provider to allocate resources judiciously. Such fine-tuning of operations can lead to significant cost savings and enhanced service quality.

While our study has yielded encouraging outcomes, it is essential to acknowledge its specific limitations. Future research could enhance the model by integrating real-time data, a crucial aspect for real-world applications in the dynamic street sweeping sector.

Funding

This work was supported by Mitacs Accelerate under Grant (IT20200) and BSI programs. This support is gratefully acknowledged.

Disclosure of interest

The authors report there are no competing interests to declare.

References

Alinaghian, M., & Shokouhi, N. (2018). Multi-depot multi-compartment vehicle routing problem, solved by a hybrid adaptive large neighborhood search. Omega, 76, 85–99. https://doi.org/10.1016/J.OMEGA.2017.05.002

Azi, N., Gendreau, M., & Potvin, J. Y. (2014). An adaptive large neighborhood search for a vehicle routing problem with multiple routes. Computers & Operations Research, 41(1), 167–173. https://doi.org/10.1016/J.COR.2013.08.016

Barrena, E., Canca, D., Coelho, L. C., & Laporte, G. (2014). Single-line rail rapid transit timetabling under dynamic passenger demand. Transportation Research Part B: Methodological, 70, 134–150. https://doi.org/10.1016/J.TRB.2014.08.013

Cao, B., Zhang, W., Wang, X., Zhao, J., Gu, Y., & Zhang, Y. (2021). A memetic algorithm based on two_Arch2 for multi-depot heterogeneous-vehicle capacitated arc routing problem. Swarm and Evolutionary Computation, 63, 100864.

Černý, V. (1985). Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm. Journal of Optimization Theory and Applications, 45(1), 41–51. https://doi.org/10.1007/BF00940812/METRICS

Cerrone, C., Dussault, B., Golden, B., & Wasil, E. (2014). Multi-period street scheduling and sweeping. International Journal of Metaheuristics, 3(1), 21.

Coelho, L. C., Cordeau, J. F., & Laporte, G. (2012). Consistency in multi-vehicle inventory-routing. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 24, 270–287. https://doi.org/10.1016/J.TRC.2012.03.007

Corberán, Á., Eglese, R., Hasle, G., Plana, I., & Sanchis, J. M. (2020). Arc routing problems: A review of the past, present, and future. Networks, 77(1), 88–115.

Cordeau, J. F., Gendreau, M., Laporte, G., Potvin, J. Y., & Semet, F. (2002). A guide to vehicle routing heuristics. Journal of the Operational Research Society, 53(5), 512–522. https://doi.org/10.1057/PALGRAVE.JORS.2601319/METRICS

Daya, B. Ben, Audy, J. F., & Lamghari, A. (2022). Characterization of the Spatiotemporal Behavior of a Sweeping System Using Supervised Machine Learning Enhanced with Feature Engineering. IFIP Advances in Information and Communication Technology, 662 IFIP, 245–261.

Delgado-Antequera, L., Laguna, M., Pacheco, J., & Caballero, R. (2020). A bi-objective solution approach to a real-world waste collection problem. Journal of the Operational Research Society, 71(2), 183–194. https://doi.org/10.1080/01605682.2018.1545520

Fernández, E., Fontana, D., & Speranza, M. G. (2016). On the Collaboration Uncapacitated Arc Routing Problem. Computers & Operations Research, 67, 120–131.

Fernández, E., Laporte, G., & Rodríguez-Pereira, J. (2017). A Branch-and-Cut Algorithm for the Multidepot Rural Postman Problem. Transportation Science, 52(2), 353–369.

Gendreau, M., Potvin, J.-Y., Bräysy, O., Hasle, G., & Løkketangen, A. (2008). Metaheuristics for the Vehicle Routing Problem and Its Extensions: A Categorized Bibliography. Springer Verlg, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-0-387-77778-8

Kancharla, S. R., & Ramadurai, G. (2020). Electric vehicle routing problem with non-linear charging and load-dependent discharging. Expert Systems with Applications, 160, 113714. https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2020.113714

Kek, A. G. H., Cheu, R. L., & Meng, Q. (2008). Distance-constrained capacitated vehicle routing problems with flexible assignment of start and end depots. Mathematical and Computer Modelling, 47(1–2), 140–152.

Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by Simulated Annealing. Science, 220(4598), 671–680. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.220.4598.671

Kraiem, A., Audy, J.-F., & Lamghari, A. (2023). Mixed integer linear programming model for a multi-depot arc routing problem with different arc types and flexible assignment of end depot. Conference Paper, World Conference on Transport Research, 17-21 July, Montréal, Canada.

Krushinsky, D., & Van Woensel, T. (2015). An approach to the asymmetric multi-depot capacitated arc routing problem. European Journal of Operational Research, 244(1), 100–109.

Lahyani, R., Gouguenheim, A. L., & Coelho, L. C. (2019). A hybrid adaptive large neighbourhood search for multi-depot open vehicle routing problems. International Journal of Production Research, 57(22), 6963–6976. https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1572929/SUPPL_FILE/TPRS_A_1572929_SM4034.PDF

Laporte, G., Musmanno, R., & Vocaturo, F. (2010). An adaptive large neighbourhood search heuristic for the capacitated arc-routing problem with stochastic demands. Transportation Science, 44(1), 125–135. https://doi.org/10.1287/trsc.1090.0290

Li, H., Wang, F., & Zhan, Z. (2024). Truck and rotary-wing drone routing problem considering flight-level selection. Journal of the Operational Research Society, 75(2), 205–223. https://doi.org/10.1080/01605682.2023.2185548

Li, J., Li, Y., & Pardalos, P. M. (2014). Multi-depot vehicle routing problem with time windows under shared depot resources. Advanced Course on Data Science and Machine Learning, 31(2), 515–532.

Liu, R., Tao, Y., & Xie, X. (2019). An adaptive large neighborhood search heuristic for the vehicle routing problem with time windows and synchronized visits. Computers & Operations Research, 101, 250–262. https://doi.org/10.1016/J.COR.2018.08.002

Mancini, S. (2016). A real-life Multi Depot Multi Period Vehicle Routing Problem with a Heterogeneous Fleet: Formulation and Adaptive Large Neighborhood Search based Matheuristic. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 70, 100–112. https://doi.org/10.1016/J.TRC.2015.06.016

Markov, I., Varone, S., & Bierlaire, M. (2016). Integrating a heterogeneous fixed fleet and a flexible assignment of destination depots in the waste collection VRP with intermediate facilities. Transportation Research Part B: Methodological, 84, 256–273.

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.

Negreiros Gomes, M. J., Palhano, A. W. D. C., & Reis, E. C. R. (2023). Sector arc routing-based spatial decision support system for waste collection in Brazil. Waste Management & Research, 41(1), 214–221.

Pereira, M. A., Coelho, L. C., Lorena, L. A. N., & De Souza, L. C. (2015). A hybrid method for the Probabilistic Maximal Covering Location–Allocation Problem. Computers & Operations Research, 57, 51–59. https://doi.org/10.1016/J.COR.2014.12.001

Petropoulos, F., Laporte, G., Aktas, E., Alumur, S. A., Archetti, C., Ayhan, H., Battarra, M., Bennell, J. A., Bourjolly, J. M., Boylan, J. E., Breton, M., Canca, D., Charlin, L., Chen, B., Cicek, C. T., Cox, L. A., Currie, C. S. M., Demeulemeester, E., Ding, L., … Zhao, X. (2024). Operational Research: methods and applications. Journal of the Operational Research Society, 75(3), 423–617. https://doi.org/10.1080/01605682.2023.2253852

Pisinger, D., & Ropke, S. (2007). A general heuristic for vehicle routing problems. Computers and Operations Research, 34(8), 2403–2435. https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.09.012

Quirion-Blais, O., Trépanier, M., & Langevin, A. (2015). A case study of snow plow routing using an adaptive large hood search metaheuristic. Transportation Letters, 7(4), 201–209. https://doi.org/10.1179/1942787514Y.0000000042

Riquelme-Rodríguez, J. P., Gamache, M., & Langevin, A. (2014). Periodic capacitated arc-routing problem with inventory constraints. Journal of the Operational Research Society, 65(12), 1840–1852. https://doi.org/10.1057/JORS.2013.159

Ropke, S., & Pisinger, D. (2006). An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows. Transportation Science, 40(4), 455–472. https://doi.org/10.1287/trsc.1050.0135

Sacramento, D., Pisinger, D., & Ropke, S. (2019). An adaptive large neighborhood search metaheuristic for the vehicle routing problem with drones. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 102, 289–315. https://doi.org/10.1016/J.TRC.2019.02.018

Salazar-Aguilar, M. A., Langevin, A., & Laporte, G. (2012). Synchronized arc routing for snow plowing operations. Computers and Operations Research, 39(7), 1432–1440. https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.08.014

Strand, M., Syberfeldt, A., & Geertsen, A. (2020). A decision support system for sustainable waste collection. In Information Resources Management Association (Ed.), Waste Management: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications (Vol. 3, pp. 347–365).

Tunalioğlu, R., Koç, Ç., & Bektaş, T. (2016). A multiperiod location-routing problem arising in the collection of Olive Oil Mill Wastewater. Journal of the Operational Research Society, 67(7), 1012–1024. https://doi.org/10.1057/JORS.2015.121

Ulsrud, K. P., Vandvik, A. H., Ormevik, A. B., Fagerholt, K., & Meisel, F. (2022). A time-dependent vessel routing problem with speed optimization. European Journal of Operational Research, 303(2), 891–907. https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2022.03.015

Vidal, T., Crainic, T. G., Gendreau, M., Lahrichi, N., & Rei, W. (2013). A Hybrid Genetic Algorithm for Multidepot and Periodic Vehicle Routing Problems. Operations Research, 60(3), 611–624. https://doi.org/10.1287/OPRE.1120.1048

Wøhlk, S., & Laporte, G. (2018). A fast heuristic for large-scale capacitated arc routing problems. Journal of the Operational Research Society, 69(12), 1877–1887. https://doi.org/10.1080/01605682.2017.1415648

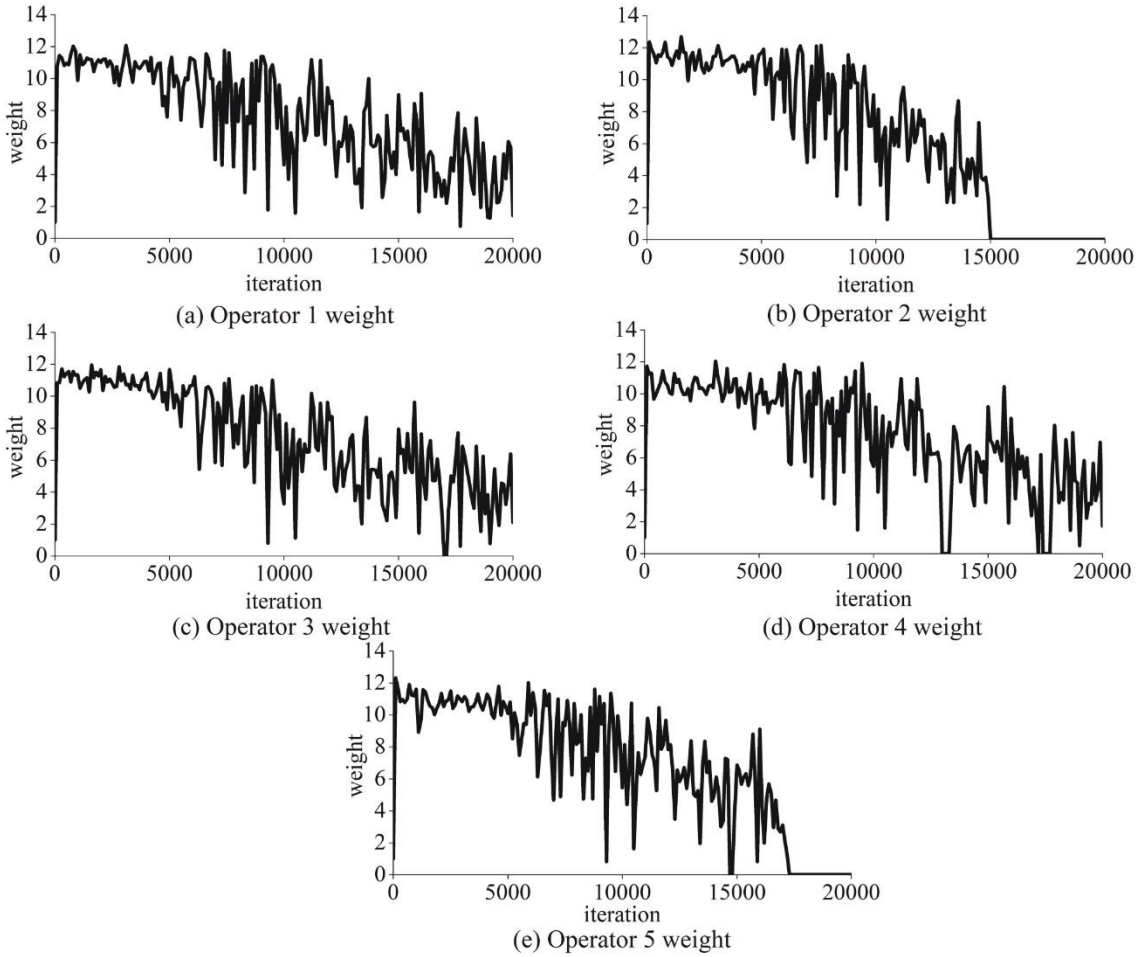
Yu, B., Xin, J., & D'Ariano, A. (2019). Route Planning of A Sanitation Vehicle in A Dynamic Traffic Environment. Proceedings - 2019 Chinese Automation Congress, CAC 2019, 2898–2903. https://doi.org/10.1109/CAC48633.2019.8997003

Yurtseven, C., & Gökçe, M. A. (2019). A novel arc-routing problem of electric powered street sweepers with time windows and intermediate stops. IFAC-PapersOnLine, 52(13), 2308–2313.

Appendix A

Figure A1 illustrates the evolution of weights for the five heuristics over iterations for an instance with n=200 nodes. The x-axis signifies the iteration number, and the y-axis represents the weight. The graphs show that, for this instance, operator O3 being the most critical, followed by O2, O5, O4, and O1. The decreasing trend is due to the simulated annealing acceptance criteria, becoming stricter towards the end of the search.

Figure A1
Weight variation for n=200 nodes. (a) Operator 1 weight (b) Operator 2 weight (c) Operator 3 weight (d) Operator 4 weight (e) Operator 5 weight



(a) Operator 1 weight

(b) Operator 2 weight

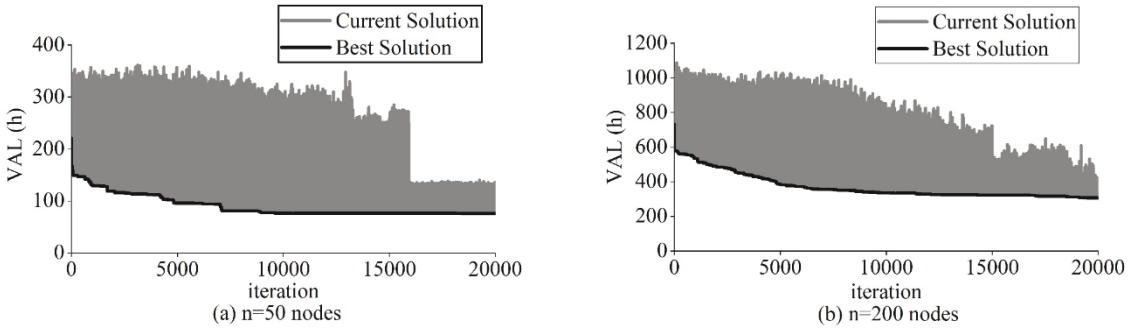
(c) Operator 3 weight

(d) Operator 4 weight

(e) Operator 5 weight

For the instance with n = 50 nodes, the algorithm converges to the best-found solution after about 9000 iterations, resulting in a flat curve for the best-known solution identified by ALNS. At this point, the method reached a local optimum and was unable to make further improvements. During the search, the algorithm inspects the solution space, accepting solutions that are worse than the current best with certain probability according to the value of the current temperature. The algorithm tolerates solutions considerably worse than the current best, resulting in notable fluctuations in the graph. However, as the temperature decreases, these fluctuations become more controlled, and only solutions with very slight deterioration are accepted. Meanwhile, for instance with n = 200 nodes, similar fluctuations are observed in the graph, and the curve representing the best-known solution shows a more gradual descent, as the optimal solution remains unknown. Similarly, the algorithm is more inclined to accept solutions significantly worse than the current best-known solution at the beginning of the search. Correspondingly, towards the later stages, the algorithm becomes more selective, only accepting solutions that are slightly worse.

Figure A2
Current and best solutions values. (a) n=50 nodes (b) n=200 nodes



Next, to verify the robustness and statistical significance of our results, we employed the Wilcoxon signed-rank test with a significance level of $\alpha = 0.05$. The results are presented below.

Table A3: P-values of objective values for ALNS vs ALNS-Oi comparisons

Operator	n=228	n=150	n=50
O1	0.6581	0.5316	0.286
O2	9.841e-06	5.39e-11	3.808e-08
O3	9.938e-09	2.2e-16	2.2e-16
O4	9.138e-06	3.649e-06	0.001912
O5	5.109e-05	9.444e-08	6.626e-08

O2, O3, and O5 significantly impact the objective values, while O1 and O4 have less impact. Removing any of O2, O3, or O5 results in a statistically significant drop in performance.

Table A4: P-values of CPU times for ALNS vs ALNS-Oi comparisons

Operator	n=228	n=150	n=50
O1	3.751e-08	2.2e-16	0.9189
O2	0.2063	0.0001832	1.659e-13
O3	0.01118	0.002621	2.2e-16
O4	0.03878	2.2e-16	2.97e-06
O5	0.04044	2.2e-16	2.2e-16

O2, O3, and O5 have a significant effect on CPU time. O1 and O4 impact CPU time but are less consistent across instance sizes.

Table A5: Pairwise P-values of objective values for ALNS-Oi variants (n=228)

Operator	O1	O2	O3	O4	O5
O1	-	0.0009651	0.0001256	0.004273	0.001538
O2		-	0.5002	0.4315	0.7484
O3			-	0.09131	0.4107
O4				-	0.5766
O5					-

Significant differences are observed between O1 and other operators. O2 and O5 are generally superior, with less difference between O3, O4, and O5.

Table A6: Pairwise P-values of CPU times for ALNS-Oi variants (n=228)

Operator	O1	O2	O3	O4	O5
O1	-	9.377e-05	2.2e-16	2.81e-05	5.92e-05
O2		-	8.35e-05	0.8024	0.7499
O3			-	5.304e-07	7.205e-07
O4				-	0.9004
O5					-

Significant differences are observed in CPU times, with O2 generally being less efficient compared to other operators. O4 and O5 are similar in efficiency, and O1 is often the most efficient.

4.2. ARTICLE 2

Le second article, intitulé « A PDCA-based decision-support framework for evaluating technological innovation in street sweeping operations », est cosigné avec les professeurs Audy et Lamghari, et a été soumis le 17 mai 2026 au journal *International Journal of Productivity and Performance Management*. La version insérée dans cette thèse est identique à celle soumise. Le titre et le résumé en français de l'article sont indiqués ci-dessous.

Titre : Développement d'une brosse de balayage permettant des opérations à haute vitesse: une analyse basée sur le problème de tournées de véhicules.

Résumé : Le balayage des rues constitue un service urbain essentiel contribuant à la réduction de la pollution. Toutefois, l'amélioration de son efficacité opérationnelle demeure un enjeu important. Cette étude répond à un besoin exprimé par un prestataire de services souhaitant s'appuyer sur des analyses quantitatives afin d'améliorer sa performance, d'orienter ses investissements en R&D et de renforcer sa compétitivité dans les appels d'offres. Alors que la littérature s'est principalement intéressée au lien entre la vitesse de balayage et la qualité du nettoyage, les impacts économiques et opérationnels associés à une augmentation de la vitesse restent peu explorés. Pour combler cette lacune, cette recherche adopte une démarche d'amélioration continue et mobilise une métaheuristique de recherche adaptative à grand voisinage afin d'analyser l'effet des variations de vitesse sur la planification des tournées, les coûts et les durées d'opération. Les résultats montrent qu'une augmentation de la vitesse jusqu'à 19,9 km/h permettrait de réduire les durées et les coûts opérationnels de 40 à 57 %. De tels gains supposent toutefois l'utilisation de brosses de balayage à haute performance, capables de maintenir la qualité du nettoyage à des vitesses élevées, contrairement aux brosses conventionnelles, dont l'efficacité diminue dans ces conditions. L'étude propose également des projections des gains de temps et de coûts selon différents horizons opérationnels, permettant d'améliorer l'évaluation du retour sur investissement et d'orienter les décisions d'investissement en R&D liées aux

équipements. Cette recherche met ainsi en évidence le rôle conjoint de la performance des équipements, des résultats économiques quantifiables et de la planification opérationnelle pour appuyer des décisions managériales en faveur de l'innovation.

ARTICLE 2: A PDCA-BASED DECISION-SUPPORT FRAMEWORK FOR EVALUATING TECHNOLOGICAL INNOVATION IN STREET SWEEPING OPERATIONS

Ameni Kraiem[a]*, Jean-François Audy[a,b] and Amina Lamghari[a,c]

[a]Department of Management, Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, QC G8Z 4M3, Canada; [b]Interuniversity Research Center on Enterprise Networks, Logistics and Transportation (CIRRELT), Montréal, QC H3T 1J4, Canada; [c]Group for Research in Decision Analysis (GERAD), Montréal, QC H3T 1N8, Canada

*Corresponding author: ameni.kraiem@uqtr.ca

Abstract

Purpose

This paper evaluates how technological improvements enabling higher street sweeping speeds can improve operational performance in spring street sweeping operations. The study also introduces a framework for evaluating technological innovations in municipal service operations by explicitly linking technological characteristics, operational planning, performance indicators, and economic outcomes within a unified decision-support structure.

Design/methodology/approach

The study integrates multiple sweeping-speed scenarios within an adaptive large neighborhood search routing framework structured according to the Plan–Do–Check–Act logic. For each scenario, routing solutions are generated to evaluate operational duration and costs.

Findings

The results show that increasing sweeping speed can substantially reduce operational duration and operating costs, with reductions reaching approximately 57% under high-speed scenarios. The largest performance gains are observed at low-to-moderate speed increases, while marginal improvements decrease at higher speeds. These gains are only possible if cleaning quality is maintained at higher speeds. The proposed framework provides a structured approach for evaluating technological innovations in municipal service operations.

Practical implications

The proposed framework can support municipal authorities and service providers in evaluating technological innovations before implementation.

Social implications

More efficient street sweeping operations may contribute to cleaner urban environments and improved public health conditions.

Originality/value

To the best of our knowledge, this is the first study in this field to quantitatively evaluate the operational and economic implications of increased sweeping speed within a PDCA-based decision-support and routing optimization framework. Beyond the specific case of street sweeping operations, the manuscript also introduces a generic analytical framework for evaluating technological innovations in municipal service operations.

Keywords: Continuous improvement; Decision making; Performance improvement; Optimization techniques; Cost analysis; Technological innovation

1. INTRODUCTION

Maintaining road safety during winter requires the extensive application of abrasives such as sand and gravel. In Quebec (Canada), approximately 1.8 million tons of these materials are applied annually for winter road maintenance (Mokhbi et al., 2017). With the arrival of spring, road networks must be cleaned to maintain road safety and reduce environmental and public health risks (Rubio-Calderón et al., 2025). This operation is mainly performed using mechanical sweeping vehicles equipped with specialized brushes.

Improving the operational efficiency of spring sweeping operations remains challenging. Many municipal service operations still rely on manual planning approaches rather than structured decision-support systems (Strand et al., 2020). In particular, service providers often lack analytical tools to evaluate ex ante how modifications in equipment performance or operating conditions affect operational efficiency and total operating costs.

Among the operational parameters involved in street sweeping, sweeping speed plays an important role. Previous studies mainly examined sweeping speed from technical perspectives such as cleaning efficiency, pollutant reduction, vacuum performance or energy consumption (Pan et al., 2023; Wang et al., 2025). Other studies focused on routing optimization under fixed operating conditions (Kraiem et al., 2024; Parsons et al., 2025). However, limited attention has been devoted to evaluating how changes in sweeping speed influence operational efficiency and economic performance.

This gap is particularly important in the context of technological innovation. To the best of our knowledge, no study has proposed a structured analytical framework for evaluating whether higher-performance sweeping technologies, such as improved brushes enabling higher operating speeds, can generate measurable operational and economic benefits under realistic routing constraints.

To address this limitation, this paper extends the ALNS framework proposed by Kraiem et al. (2024) by integrating a cost-based analysis of multiple sweeping-speed scenarios within a PDCA logic. The study evaluates the impact of increased sweeping speeds on operational duration and operating costs while proposing a decision-support framework for assessing technological innovations in municipal service operations.

The contribution of this work is threefold. First, it explicitly links a technical equipment parameter (sweeping speed) to system-level operational outcomes through an optimization-based framework. Second, it provides a structured economic evaluation of potential equipment upgrades under different performance assumptions. Third, beyond the specific case of sweeping brushes, the paper introduces an analytical framework for evaluating technological innovations in street sweeping and related municipal service operations by linking technical performance, operational planning and economic outcomes. To the best of our knowledge, no previous study has proposed a transferable decision-support framework capable of supporting the ex-ante evaluation of technological innovations in this field under realistic operational constraints.

The remainder of this article is organized as follows. Section 2 reviews the literature. Section 3 describes the methodology. Section 4 presents and analyzes the numerical results. Section 5 discusses managerial insights and research limitations, and Section 6 concludes and outlines directions for future research.

2. LITERATURE REVIEW

This review focuses on three directly relevant streams: technical studies on sweeping speed and cleaning quality, optimization studies on street sweeping operations, and the limited literature on the economic evaluation of operational or equipment changes in this context. Table I summarizes the previous studies related to street sweeping operations.

2.1. Sweeping speed and cleaning quality

Previous studies on street sweeping have mainly examined technical performance aspects such as cleaning efficiency, pollutant removal, energy consumption and vacuum system performance (Table 1). Among the operational parameters discussed in the literature, sweeping speed emerges as a key factor influencing street sweeping operations.

2.1.1 Variable sweeping speed

Several studies treat sweeping speed as a variable parameter to evaluate its effect on technical and operational performance. For example, Pan et al. (2023) used computational fluid dynamics (CFD) to examine how vehicle speed and airflow affect vacuum suction efficiency, highlighting trade-offs between cleaning performance, speed and energy consumption. Daya et al. (2022) also treated sweeping speed as a variable when applying machine-learning methods to analyze the spatiotemporal behavior of sweeping systems. In addition, Jeong et al. (2025) evaluated how variations in sweeping speed affect the reduction of resuspended particulate matter in urban environments. Although some studies suggest specific operating speeds after experimental testing, these values are not generalized. In practice, sweeping speed varies widely depending on regulatory constraints, debris quantity, road surface conditions, weather and traffic (Washington Stormwater Center, 2026). Empirical studies and operational reports illustrate this variability. Donati et al. (2020) indicated

that typical sweeping speeds during cleaning operations can reach up 10 to 20 km/h. Wang et al. (2025) identified an optimal speed of approximately 12 km/h to balance energy consumption, cleaning rate (above 90%) and energy efficiency. Similarly, Fayzullayevich et al. (2022) reported improved sweeping efficiency above 5 km/h, with optimal performance generally observed between 6 and 14 km/h depending on debris characteristics. Field and operational reports further support these ranges. A study conducted over three field seasons in Toronto evaluated different street sweeper technologies and reported operating speeds of 8 to 15 km/h for conventional mechanical sweepers under typical working conditions (Environment Canada, 2007). In practice, some street sweeping equipment suppliers in the United States recommend operating speeds between 4.8 and 11.2 km/h depending on debris type and road surface.

2.1.2. Fixed sweeping speed

Other studies considered sweeping speed as a fixed operational parameter. For example, Das & Wiseman (2024) investigated the effectiveness of municipal street sweeping in removing road pollutants, emphasizing the influence of standard operational practices on cleaning efficiency. Milijaš et al. (2023) developed a cleaning control system aimed at reducing water consumption. Similarly, Ben Daya et al. (2024) used discrete-event simulation to compare greenhouse gas emissions and operational performance of two sweeping systems under different operational scenarios. Recent studies linked street sweeping performance with citizen perception indicators to support more sustainable and efficient urban cleaning strategies (Guedes et al., 2025; Rubio-Calderón et al., 2025).

While these studies examine sweeping speed in relation to brush performance, pollutant reduction, vacuum operation and indicators such as cleaning efficiency, distance, energy consumption and travel time, they generally overlook the economic implications of these operational parameters. This research therefore complements

existing work by incorporating an economic perspective, evaluating how variations in sweeping speed influence both makespan and total operating cost.

2.2. Route optimization in street sweeping

Building on these operational objectives, other studies addressed performance improvements through routing optimization. Parsons et al. (2024, 2025) proposed a two-stage heuristic method for municipal street sweeping that first clusters streets into balanced operational areas, then optimized intra-area routes. Lamghari et al. (2025) proposed decomposition-based methods to minimize completion time and deadheading distance under realistic operational constraints. Liu et al. (2024) developed a two-stage heuristic that first selects optimal depot locations, then routing vehicles to serve required street arcs. More recently, Kraiem et al. (2025) introduced a Mixed-Integer Linear Programming (MILP) model for the Multi-Depot Arc Routing Problem with Flexible Assignment of End Depot (MDARPFED), which performs well on small instances but becomes computationally challenging for large real-world problems. To address this limitation, Kraiem et al. (2024) proposed an adaptive large neighborhood search (ALNS) algorithm capable of solving larger instances by minimizing the number of shifts and total travel time for heterogeneous arc types. In contrast, the present study incorporates sweeping speed as a variable of analysis within the ALNS framework proposed by Kraiem et al. (2024) and extends the evaluation to economic outcomes, enabling a joint assessment of its impact on operational performance (makespan and number of shifts) and total operating costs. This provides a more comprehensive decision-support analysis compared to the primarily operational focus of the previous works.

Table 1
Key performance indicator and methodologies review for street sweeping

Sweeping speed	References	Objective						Performance indicator					Methodology
		Brushes effectiveness	Pollutant reduction	Pollutant detection	Routing	Vacuum design	Vacuum operation	Cleaning efficiency	Distance	Energy consumption	Travel time	Citizen perception	
Variable	Wang et al. (2025)	✓						✓		✓			YOLO v5 and fuzzy control
	Daya et al. (2022)						✓		✓		✓		Machine learning and feature engineering
	Pan et al. (2023)					✓		✓		✓			CFD and optimization
	Fayzullayevich et al. (2022)					✓	✓	✓					CFD
	Jeong et al. (2025)		✓					✓					Statistical analysis
	Donati et al. (2020)			✓				✓		✓			Deep learning and sensor-based control
	Yang et al. (2018)	✓						✓					Experimental design and modeling
	Vanegas-Useche et al. (2015)	✓						✓					Laboratory comparison
	Kraiem et al. (2025)				✓						✓		MILP
	Rubio-Calderón et al. (2025)		✓					✓				✓	Simulation
	Guedes et al. (2025)		✓					✓				✓	Iterative optimisation algorithm
	Kraiem et al. (2024)				✓						✓		ALNS
	Ben Daya et al. (2024)						✓		✓	✓	✓		Simulation

Fixed	Das & Wiseman (2024)		✓					✓					Field sampling and laboratory analysis
	Parsons et al. (2025)				✓				✓				Heuristics
	Milijaš et al. (2023)		✓			✓		✓					Experimental testing of prototype vehicle
	Yurtseven & Gökçe (2019)				✓					✓			Mathematical model
	Bartolozzi et al. (2018)						✓	✓		✓			Life cycle assessment (LCA)
	Cerrone et al. (2014)				✓				✓				Genetic algorithm

2.3. Economic evaluation of operational changes

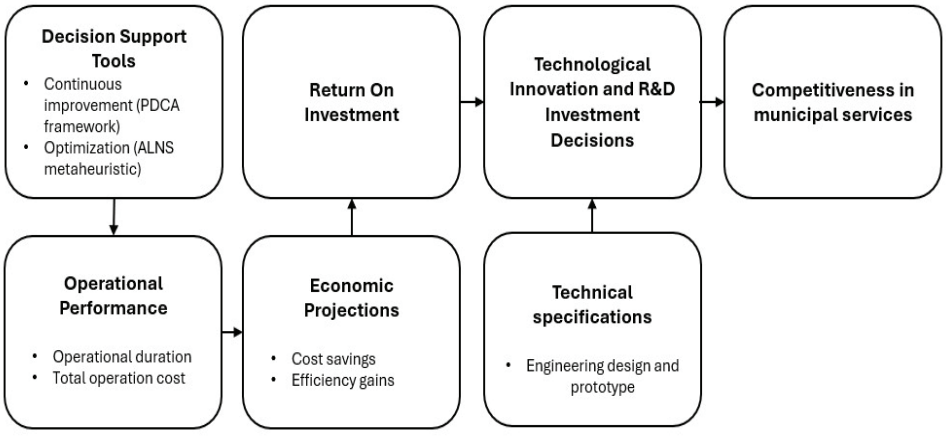
While street sweeping operations have been explored using various methodologies, their economic implications remain largely underdeveloped. Previous studies mainly addressed technical aspects or operational issues, with limited attention to the financial consequences of operational changes. This gap is particularly critical in the context of public service, where service providers operate under tight R&D budgetary and short operating season time constraints that limit experimentation with new equipment or practices (Kraiem et al., 2024). In such settings, decision-support analysis plays a key role by linking operational performance to quantifiable economic outcomes and enabling the evaluation of return on investment (Liu & Lai, 2025).

Despite the importance of decision-support analysis, many service providers still lack structured analytical approaches, slowing the adoption of technological improvements and limiting competitiveness in tendering processes. The OECD reported that 72% of agencies lack tools to measure the return on investment of innovation (OECD, 2015). Cinar et al. (2019, 2021) highlighted key barriers such as limited funding, insufficient technological infrastructure and lack of expertise to implement innovation. Similarly, previous studies emphasized that innovation

performance depends not only on technological improvements themselves, but also on the ability to transform these innovations into operational capabilities and measurable performance gains through structured decision-support and coordination mechanisms (Conti and Chiarini, 2021; Yang et al., 2026). As a result, uncertainty regarding expected economic benefits may discourage firms from investing in operational innovations, even when technical improvements are available. To address these limitations, decision-support analysis and operational optimization methods can therefore help providers demonstrate measurable efficiency gains and justify innovation investments while maintaining service quality at lower cost.

This study addresses this gap by integrating variations in sweeping speed into an ALNS optimization framework and quantifying their impact not only on total travel time (makespan) but also on total operating costs and the number of shifts. Overall, prior studies either examine the technical effects of sweeping speed or optimize routing under fixed-speed assumptions. What remains missing is a quantitative evaluation of how changes in sweeping speed affect both operational performance and cost within a routing framework. Based on the gaps identified in the literature, the following research framework structures the analysis (Figure 1). All figures are the authors' own work.

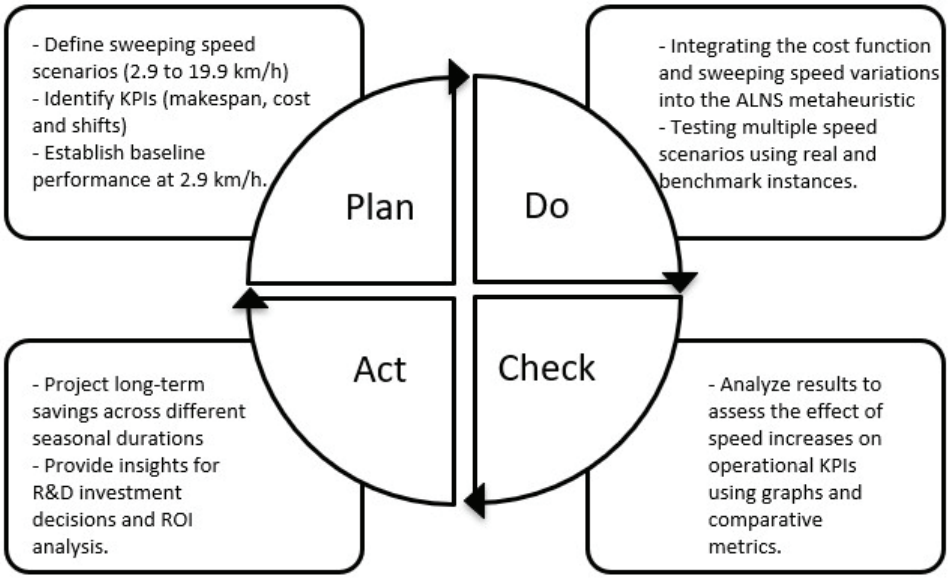
Figure 1
Research framework



3. METHODOLOGY

To structure the analysis, the study is organized using a PDCA logic as illustrated in Figure 2 (Silva et al., 2017). However, the core methodological component remains the ALNS-based routing and cost evaluation framework.

Figure 2
PDCA cycle applied to the operational evaluation of increased sweeping speeds



3.1. Planning of the tests (plan)

First, a sweeping speed interval is defined for testing, ranging from 2.9 km/h to 19.9 km/h with 1 km/h increments. The tested range includes both operationally plausible values (up to approximately 15 km/h), corresponding to speeds commonly observed in practice, and exploratory upper-bound scenarios (above 15 km/h), which are not necessarily intended as realistic operating targets but are used to assess the sensitivity of cost and duration to speed variations. This distinction is supported by the literature: Fayzullayevich et al. (2022) show through numerical simulations that suction efficiency in regenerative air sweepers is strongly influenced by speed, with higher

speeds reducing particle capture due to shorter interaction times and less favorable airflow conditions. As a result, performance gains observed at higher speeds should be interpreted conditionally on maintaining acceptable cleaning quality.

Next, key performance indicators (KPIs) are identified, including working days, makespan, total cost and associated reductions. Baseline performance is also established using available data from conventional speed operation (2.9 km/h) to be used as a reference point for comparison.

3.2. Execution of the tests (Do)

The ALNS framework used in this study builds on Kraiem et al. (2024), where the objective is to minimize makespan and the number of shifts under a fixed sweeping speed. In this study, the framework is extended by treating sweeping speed as a variable parameter and by evaluating the associated makespan, number of shifts and operating costs for each scenario. For each predefined sweeping speed, service times are recalculated within the ALNS, which then generates a routing solution minimizing makespan and the number of shifts. The total operating cost is evaluated in a post-processing step by applying a cost function to the routing solutions obtained from the ALNS, using a separate evaluation procedure. Interestingly, the analysis shows that minimizing the cost directly produces the same routing solutions as makespan and number of shifts optimization, highlighting the robustness of the solutions across operational and economic objectives. Moreover, the ALNS is particularly well-suited for large-scale combinatorial problems such as vehicle routing, due to its flexibility and ability to efficiently explore large and complex solution spaces (Pisinger & Ropke, 2010).

The ALNS was applied 30 times for each speed scenario to ensure solution stability. The cost function is presented in Figure 3. The cost parameters are based on representative estimates derived from operational assumptions and typical operating

conditions observed in municipal street sweeping operations. These values should therefore be interpreted as illustrative operational estimates intended to reflect realistic operating conditions. In the total cost function $Z(s)$, each arc (i,j) in the solution s contributes to the variable cost based on whether it falls in night or day shift. For a day shift, the service time S_{ij} and traverse time t_{ij} are multiplied respectively by the variable cost 600$ per hour and 511$ per hour, while for a night shift, it is 627$ per hour for traverse and 706$ per hour for service. In addition to the variable costs, a fixed cost is added, calculated as 2420 per day shift and 2635 per night shift. The total cost Z(s) is the sum of the variable and fixed costs.

A sensitivity analysis was conducted by varying all cost parameters (fixed and variable) by ±10% for selected speed scenarios. The resulting total costs are used to assess the robustness of the economic outcomes. Detailed calculations are presented in subsection 4.3.

Figure 3
Pseudo-code for total cost function

```
Calculate_Z(s)
  variable_cost ← 0
  For each arc (i,j) in s do
    If (Shift=Night Shift) then
      If ((i,j) is serviced) then
        cost(i,j) ← 706 S_ij
      Else
        cost(i,j) ← 627 t_ij
      End if
    Else
      If ((i,j) is serviced) then
        cost(i,j) ← 600 S_ij
      Else
        cost(i,j) ← 511 t_ij
      End if
    End if
    variable_cost ← variable_cost + cost(i,j)
  End for
  fixed_cost ← (2420 × number of day shifts) + (2635 × number of night shifts)
  Z(s) ← variable_cost + fixed_cost
  Return Z(s)
```

The ALNS is used to test higher-speed scenarios, with their impact on routing and KPIs, through the use of real and randomly generated instances from Cordeau's MDVRP instances (http://neumann.hec.ca/chairedistributique/data/mdvrp/new).

For real instances, data were derived from two administrative regions in Quebec (Canada) based on MTQ-managed contracts. Geographic coordinates, travel distances and travel times were generated using Google Maps and integrated into the optimization framework following the procedure described in Kraiem et al. (2025). In addition, benchmark instances, with 100, 150 and 200 nodes, adapted from Cordeau's MDVRP datasets were used to represent street sweeping operations. A total of 17 instances, including real-world and benchmark cases under a four-depot structure, were tested.

3.3. Analysis and verification (Check)

After the tests were completed, the results were thoroughly analyzed to measure the impact of the increased sweeping speeds on the KPIs. The results are presented through graphs showing the percentage reductions in these KPIs as a function of sweeping speed.

3.4. Adjustment and implementation (Act)

Based on the analysis results, this study provides key inputs, namely, potential cost and time reductions at various sweeping speeds, that serve as foundational elements for future R&D investment decision regarding higher performance sweeping brushes and support subsequent return on investment (ROI) and economic analyses. This entailed a complete economic projection that made predictions regarding cuts in shifts, makespan and total costs over different seasonal periods. The projection used an 86.4 days season as a reference, based on representative operational assumptions,

applying a ±15 to 20% variation to assess the impact of season duration fluctuations. This step helps the service providers toward an informed investment decision, ensuring that the improvements in efficiency and savings are properly integrated into future budgeting and operational plans. By translating the insights from the study into actionable improvements, we aim to enhance both financial and operational performance.

4. RESULTS

This section presents the computational results for different sweeping speed scenarios. The analysis examines the impact of sweeping speed on makespan, number of shifts, and total operating cost. A projection of the associated savings is also provided.

4.1. Parameter setting

In line with the first phase of the PDCA cycle described in Section 3.1, the computational experiments were designed to analyze the impact of increasing sweeping speed (SS) on makespan and total operating cost. The experiments start from the service provider's current operating speed (SS0 = 2.9 km/h) and increase incrementally by 1 km/h up to SS17 = 19.9 km/h. To assess the impact of these changes, the reductions in makespan and cost at each speed level (SS1, SS2, …, SS17) are calculated relative to the baseline performance at SS0. The ALNS algorithm is applied to two real-world instances and three sets of benchmark instances (100, 150, and 200 nodes). For each size, five independent problem instances (i1, i2, …, i5) are generated from Cordeau's MDVRP datasets and adapted as described in Kraiem et al. (2025).

Each instance is solved 30 times to account for the stochastic nature of the ALNS heuristic. The results reported in this study correspond to the average values over the 30 runs for each instance and speed scenario. Preliminary tests showed that 30

runs provide stable estimates of makespan and cost, with limited variability across runs, making this number sufficient for reliable performance evaluation.

4.2. Impact of sweeping speed increase on makespan

This section corresponds to the second and third phases of the PDCA cycle and details the average makespan (in hours) required for sweeping operations across different instance sizes (100, 150 and 200 nodes) and sweeping speeds (SS0 to SS17). The results are presented in Table 2. The percentage reduction in makespan (R_i) is calculated as:

$$R_i(\%) = 100 * (makespan_{SS0} - makespan_{SSi})/makespan_{SS0} \quad (1)$$

Table 2
Makespan and corresponding percentage reduction for the instances

		100N		150N		200N		Average reduction (%)	Marginal reduction (%)
Speed level	SS (km/h)	Makespan (h)	Reduction (%)	Makespan (h)	Reduction (%)	Makespan (h)	Reduction (%)		
SS0	2.9	152.21	0	239.63	0	333.66	0	0	0
SS1	3.9	130.83	14.05	209.46	12.59	296.18	11.23	12.75	12.75
SS2	4.9	118.34	22.25	189.06	21.10	271.34	18.68	20.76	8.01
SS3	5.9	109.55	28.03	177.74	25.83	256.42	23.15	25.78	5.02
SS4	6.9	104.00	31.68	168.68	29.61	242.01	27.47	29.69	3.91
SS5	7.9	100.21	34.17	162.95	32.00	233.05	30.15	32.19	2.50
SS6	8.9	96.26	36.76	156.41	34.73	226.06	32.25	34.67	2.48
SS7	9.9	92.26	39.39	150.61	37.15	221.18	33.71	36.95	2.28
SS8	10.9	89.66	41.10	149.66	37.55	215.98	35.27	38.52	1.57
SS9	11.9	86.51	43.17	143.72	40.03	213.40	36.04	39.95	1.43
SS10	12.9	85.14	44.07	139.87	41.63	208.50	37.51	41.25	1.30
SS11	13.9	84.00	44.81	136.20	43.16	204.53	38.70	42.41	1.16
SS12	14.9	82.27	45.95	133.81	44.16	200.86	39.80	43.47	1.06
SS13	15.9	81.20	46.65	130.28	45.63	197.52	40.80	44.50	1.03
SS14	16.9	79.41	47.83	127.41	46.83	195.90	41.29	45.48	0.98
SS15	17.9	78.30	48.56	125.83	47.49	193.54	41.99	46.15	0.68
SS16	18.9	76.99	49.42	124.91	47.87	191.44	42.62	46.72	0.56
SS17	19.9	76.32	49.86	123.27	48.56	190.41	42.93	47.26	0.54

As the sweeping speed increases from SS0 to SS17, the average makespan consistently decreases across all instances. The results show a clear diminishing-returns

pattern. The largest makespan reductions occur at low-to-moderate speed increases, while gains at higher speeds become progressively smaller.

The maximum reduction is observed at SS17, with an average decrease of approximately 47.26% compared to the baseline speed. However, these gains must be interpreted with caution. Higher sweeping speeds may reduce cleaning quality, as reported in the literature (Amato et al., 2010; Polukarova et al., 2020), due to shorter contact time and increased debris dispersion. Therefore, the reported makespan reductions are only relevant if an acceptable level of cleaning quality can be maintained at higher speeds.

In addition, we observe that the reduction is more significant for 100N instances than for 150N and 200N instances. So, we conducted other numerical experiments on such larger instances. Specifically, four representative speed levels (SS0, SS11, SS12, SS13) were explored and were executed 30 times per instance using a maximum of 20000 iterations without any improvement. These speed values were selected to capture the upper part of the speed range where reductions begin to plateau, based on earlier trends. The results indicate that increasing the number of iterations does not alter the percentage of reductions. This aligns with the tuning methodology in Kraiem et al. (2024), where different parameter configurations were systematically evaluated and the best-performing combination was retained. Thus, our findings confirm the robustness of the approach and ensure that further increasing the number of iterations would not significantly improve solution quality.

Next, an overall measure of performance improvement across the different instance sizes is presented (Table 2). It reports the average reduction at each sweeping speed and the marginal reduction, defined as the incremental gain between two consecutive speed levels.

The results show a clear diminishing-returns pattern, allowing the identification of three distinct zones. First, a zone of rapid gains (SS1 to SS6), where increases in sweeping speed lead to substantial reductions in makespan, with high marginal improvements. Second, a zone of diminishing but still meaningful gains (SS7 to SS12), where reductions continue but at a decreasing rate. Third, a low-return zone (SS13 to SS17), where additional speed increases yield only marginal improvements.

From a decision-making perspective, the second zone (SS7 to SS12) represents the most attractive range, as it balances significant performance gains with more moderate increases in speed. In contrast, speeds beyond SS12 provide limited additional benefits and are therefore less attractive, especially considering potential trade-offs such as reduced cleaning quality. The first zone (SS1 to SS6), while offering the largest marginal gains, corresponds to lower absolute performance levels and may be considered as an initial improvement phase rather than a target operating range.

4.3. Impact of speed increase on total cost

First, a sensitivity analysis was performed on the 100N instances by varying all cost parameters (fixed and variable) by ±10%. Table 3 reports the total cost and the reductions for four sweeping speed scenarios (SS0, SS1, SS8 and SS17). The results indicate that the reductions remain nearly identical under the ±10% cost variation, confirming the robustness of the conclusions regarding the economic impacts of sweeping speed.

Table 3
Sensitivity analysis of total cost and percentage reductions for 100N instances

		100N					
Speed level	SS (km/h)	Total cost (-10%)	Reduction (%)	Total cost (reference)	Reduction (%)	Total cost (+10%)	Reduction (%)
SS0	2.9	125072	0	133558	0	152866	0
SS1	3.9	108027	13.62	117545	12	132032	13.62
SS8	10.9	75092	39.96	82715	38.11	91799	39.94
SS17	19.9	64066	48.77	69170	48.3	78302	48.77

Next, we analyzed the reduction in total cost, corresponding also to the second and third phases of the PDCA cycle. Table 4 presents the average total cost for each instance size along with the corresponding percentage reductions.

Table 4
Total cost and corresponding percentage reduction for the instances

		100N		150N		200N	
Speed level	SS (km/h)	Total cost ($)	Reduction (%)	Total cost ($)	Reduction (%)	Total cost ($)	Reduction (%)
SS0	2.9	133558	0	208127	0	278566	0
SS1	3.9	117545	12	185505	10.97	251505	9.82
SS2	4.9	106185	20.42	168314	18.85	230794	17.29
SS3	5.9	99784	25.42	158990	23.47	217444	22.07
SS4	6.9	94681	29.25	151086	27.4	206773	25.92
SS5	7.9	91515	31.6	145243	30.17	198661	28.85
SS6	8.9	88100	34.17	141971	31.82	193701	30.63
SS7	9.9	84999	36.44	136654	34.5	191546	31.45
SS8	10.9	82715	38.11	134694	35.45	187289	33.01
SS9	11.9	80105	40.06	130599	37.41	184938	33.84
SS10	12.9	78473	41.34	125984	39.65	182300	34.81
SS11	13.9	77654	41.96	123200	41.05	177940	36.38
SS12	14.9	75767	43.36	119985	42.52	175312	37.36
SS13	15.9	74773	44.11	119380	42.81	173798	37.9
SS14	16.9	72849	45.53	115567	44.53	173202	38.12
SS15	17.9	71976	46.21	113217	45.68	170543	39.06
SS16	18.9	70635	47.17	112529	45.95	169254	39.51
SS17	19.9	69170	48.3	111178	46.59	167904	39.99

The results show a clear diminishing-returns pattern in total cost reduction. Cost savings increase rapidly at low-to-moderate speeds (SS1 to SS6) across all instance sizes, followed by progressively smaller gains at higher speeds. For 100N instances, the average reduction jumps from 12 % at SS1 to 34.17 % at SS6, showing a strong improvement. Similarly, for 150N instances, the reduction moves from 10.97 % at SS1 to 31.82 % at SS6 and for 200N instances, from 9.82 % at SS1 to 30.63 % at SS6.

As with makespan, three distinct zones can be identified. A first zone of rapid gains (SS1 to SS6) captures the largest cost reductions. This is followed by a zone of diminishing but still meaningful gains (SS7 to SS12), where improvements continue at a slower rate. Finally, a low-return zone (SS13 to SS17) shows only marginal additional savings.

From a decision-making perspective, the intermediate range (SS7 to SS12) appears to offer the most balanced trade-off between cost reduction and speed increase. However, these gains must be interpreted with caution. Increasing sweeping speed beyond a certain threshold may reduce cleaning quality, particularly when using current equipment. Therefore, the reported cost reductions are only meaningful if acceptable cleaning performance can be maintained, which may require the use of higher-performance brushes.

4.4. Reduction in the number of shifts

This section, covering the second and third phases of the PDCA cycle, shows that increasing sweeping speed reduces the average number of shifts (Table V), highlighting the potential benefits of investing in more efficient brushes.

As sweeping speed increases from SS0 to SS17, the number of shifts generally decreases across all instance sizes. The results broadly present a diminishing-returns pattern. The most significant reductions occur at low-to-moderate speeds (SS1 to SS6), where the number of shifts decreases rapidly. Beyond this range, reductions continue but at a slower rate, with only marginal improvements at higher speeds.

Table 5
Number of shifts and corresponding reductions

		100N		150N		200N	
Speed level	SS (km/h)	Number of shifts	Reduction (%)	Number of shifts	Reduction (%)	Number of shifts	Reduction (%)
SS0	2.9	20.58	0	32.84	0.00	39.44	0
SS1	3.9	18.89	8.23	31.62	3.71	36.62	7.14
SS2	4.9	17.44	15.27	28.51	13.17	34.83	11.69
SS3	5.9	17.21	16.38	28.21	14.08	34.08	13.58
SS4	6.9	17.12	16.83	28.04	14.62	32.19	18.39
SS5	7.9	16.97	17.56	25.75	21.58	31.41	20.37
SS6	8.9	15.93	22.59	25.10	23.55	31.11	21.12
SS7	9.9	15.64	24.03	24.84	24.36	30.84	21.79
SS8	10.9	14.93	27.44	24.57	25.16	29.83	24.35
SS9	11.9	14.11	31.47	23.53	28.34	29.80	24.43
SS10	12.9	13.87	32.63	23.43	28.65	29.28	25.76
SS11	13.9	13.79	32.99	22.41	31.76	29.14	26.13
SS12	14.9	13.64	33.73	22.30	32.08	28.88	26.78
SS13	15.9	13.56	34.14	21.66	34.05	28.31	28.22
SS14	16.9	13.45	34.67	21.29	35.16	28.13	28.67
SS15	17.9	13.03	36.69	20.93	36.27	27.36	30.62
SS16	18.9	12.87	37.45	20.82	36.60	27.35	30.66
SS17	19.9	12.82	37.70	20.21	38.46	27.24	30.93

4.5. Economic projection and potential impact of higher-performance brushes

As part of the fourth phase of the PDCA cycle, a projection was conducted to estimate reductions in the number of working days, makespan, and total operational costs for different lengths of the spring sweeping season. The analysis used the service provider's estimated average operational period of 86.4 days as a reference, and variations of ±15% and ±20% were applied to assess the sensitivity of savings to seasonal length. The projected savings S_i for each instance set were calculated as:

$$S_i = (operational\ period * (KPI_{SS0} - KPI_{SSi}))/KPI_{SS0} \quad (2)$$

KPI represents the number of days, makespan or total cost observed at SS0.

This analysis provides quantitative inputs that could support a future ROI assessment of higher-performance equipment.

Table 6
Projected savings over a period of 86.4 days

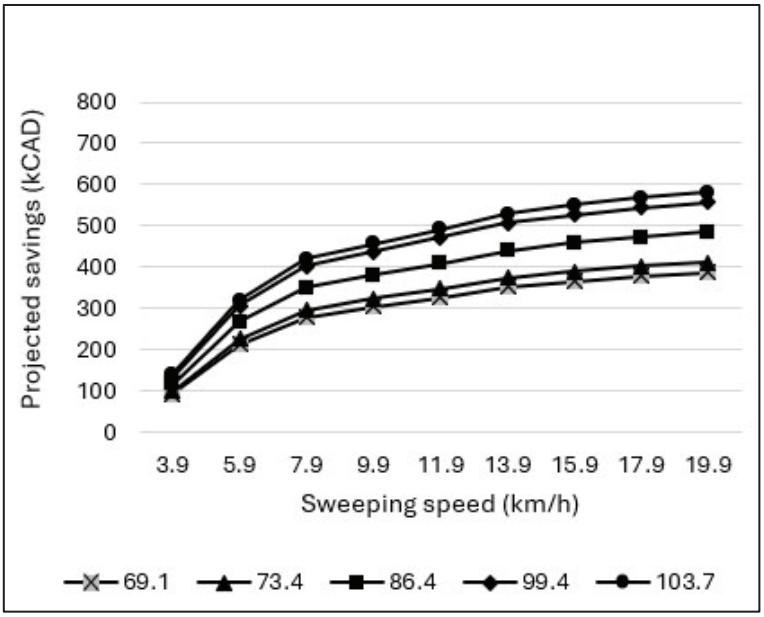
Speed level	SS (km/h)	100N			150N			200N		
		Working days (day)	Makespan (h)	Total cost ($)	Working days (day)	Makespan (h)	Total cost ($)	Working days (day)	Makespan (h)	Total cost ($)
SS0	2.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SS1	3.9	7.11	179.48	134439	3.20	158.76	119048	6.17	164.21	118568
SS2	4.9	13.20	284.36	229809	11.38	266.12	209511	10.10	273.03	209312
SS3	5.9	14.16	358.16	283544	12.17	325.69	258582	11.73	338.42	267802
SS4	6.9	14.54	404.79	326387	12.63	373.36	300172	15.89	401.54	314560
SS5	7.9	15.17	436.61	352965	18.65	403.51	330921	17.60	440.79	350104
SS6	8.9	19.52	469.72	381640	20.35	437.94	348139	18.25	471.43	371833
SS7	9.9	20.76	503.30	407674	21.05	468.46	376122	18.83	492.81	381277
SS8	10.9	23.71	525.16	426846	21.74	473.45	386434	21.04	515.58	399929
SS9	11.9	27.19	551.61	448756	24.48	504.72	407982	21.11	526.90	410228
SS10	12.9	28.19	563.10	462459	24.76	524.96	432268	22.26	548.38	421788
SS11	13.9	28.50	572.65	469338	27.44	544.27	446920	22.57	565.76	440889
SS12	14.9	29.14	587.18	485179	27.72	556.84	463838	23.14	581.86	452403
SS13	15.9	29.50	596.16	493519	29.42	575.43	467021	24.38	596.48	459036
SS14	16.9	29.96	611.20	509673	30.37	590.54	487086	24.77	603.59	461652
SS15	17.9	31.70	620.53	517007	31.34	598.83	499456	26.45	613.92	473300
SS16	18.9	32.36	631.50	528262	31.62	603.66	503076	26.49	623.11	478949
SS17	19.9	32.58	637.14	540564	33.23	612.34	510183	26.72	627.63	484862

Table 6 presents the projected savings for each instance set. For the 100N instance, working days are reduced by up to 32.58 days at the highest tested speed (SS17 = 19.9 km/h), with corresponding makespan and total cost reductions of 637.14 hours and CAD 540,564, respectively. Similar trends are observed for the 150N and 200N instances, with savings reaching 33.23 days, 612.34 hours, and CAD 510,183 for 150N, and 26.72 days, 627.63 hours, and CAD 484,862 for 200N.

Figure 4 illustrates the projected savings in total cost for 200N instances over different seasonal durations: 69.1 days (-20%), 73.4 days (-15%), 86.4 days (the

reference), 99.4 days (15%) and 103.7 days (20%). The x-axis presents the sweeping speed (km/h) and the y-axis presents the projected savings in total cost (kCAD).

Figure 4
Projected total cost savings over different seasonal durations for 200N



We also observe the same trend across the projected savings in working days and total cost for all instance sizes, confirming the robustness of these efficiency improvements.

Overall, this analysis provides quantitative estimates of potential operational and cost improvements that can inform future evaluations of investment in higher-performance brushes. It highlights the efficiency gains achievable by increasing sweeping speed under realistic operational scenarios.

4.6. Case studies

The PDCA methodology is applied to two real-world case studies, Victoriaville and Nicolet, with the Plan phase evaluating costs and makespan at different speeds, the

Do and Check phases applying and analyzing these adjustments and the Act phase projecting long-term economic savings.

4.6.1. Victoriaville case study

This case study examines spring street sweeping operations in Victoriaville, Quebec (Canada), under an MTQ-managed contract. The objective is to evaluate how increasing sweeping speeds influences operational costs and makespan in order to identify speed ranges associated with improved operational efficiency. The results are presented in Table VII.

The analysis reveals a clear trend of increasing reductions in both makespan and total cost as sweeping speed increases. The most substantial reductions occur in the lower speed range, particularly between SS1 and SS6 (zone of rapid gains), where makespan and total cost reductions reach 43.39%. This indicates that moderate speed increases yield significant operational efficiencies.

Between SS7 and SS12 (zone of diminishing but still meaningful gains), reductions continue but more gradually, with makespan improving by only 7.7% and cost savings increasing by 6.8% over this range. After SS13 (low-return zone), the benefits become marginal, with total cost savings increasing by only 5.2% and makespan by 4.9% from SS12 to SS17.

These results indicate that moderate increases in sweeping speed provide the most substantial efficiency gains, while higher speeds lead to progressively smaller benefits. As in previous analyses, these gains should be interpreted conditionally on maintaining acceptable cleaning quality.

Table 7
Makespan and total cost reductions for Victoriaville

		Victoriaville			
Speed level	SS (km/h)	Makespan (h)	Reduction (%)	Total cost ($)	Reduction (%)
SS0	2.9	93.51	0	86238	0
SS1	3.9	77.75	16.86	73105	15.23
SS2	4.9	67.66	27.64	62225	27.85
SS3	5.9	60.83	34.95	56164	34.87
SS4	6.9	55.92	40.20	52323	39.33
SS5	7.9	54.03	42.22	49517	42.58
SS6	8.9	52.94	43.39	48822	43.39
SS7	9.9	50.29	46.22	46814	45.72
SS8	10.9	49.42	47.15	46349	46.25
SS9	11.9	48.57	48.06	45952	46.72
SS10	12.9	46.63	50.13	43930	49.06
SS11	13.9	45.90	50.92	43179	49.93
SS12	14.9	45.71	51.12	42990	50.15
SS13	15.9	44.39	52.53	42242	51.02
SS14	16.9	42.62	54.43	39729	53.93
SS15	17.9	40.75	56.42	38587	55.26
SS16	18.9	40.70	56.47	38541	55.31
SS17	19.9	40.50	56.69	38391	55.48

Next, the reductions in working days, makespan and total cost were projected over different operational periods to assess the financial benefits and the overall impact on efficiency. The results are presented in Tables 8 to 11.

The results show that increasing sweeping speed leads to progressively higher projected savings in working days, makespan and operating costs across all operational periods. The most notable reductions occur between SS1 and approximately SS6, after which the gains continue but with smaller increments, indicating a gradual approach to a plateau.

Table 8
Projected savings in working days for Victoriaville

Speed level	SS (km/h)	Working days (day)				
		69.1	73.4	86.4	99.4	103.7
SS0	2.9	0	0	0	0	0
SS1	3.9	11.03	11.72	13.79	15.87	16.55
SS2	4.9	18.49	19.64	23.11	26.59	27.74
SS3	5.9	21.74	23.10	27.19	31.28	32.63
SS4	6.9	24.91	26.46	31.14	35.83	37.38
SS5	7.9	27.32	29.02	34.16	39.30	41.00
SS6	8.9	27.33	29.03	34.18	39.32	41.02
SS7	9.9	27.50	29.21	34.39	39.56	41.27
SS8	10.9	27.61	29.33	34.52	39.71	41.43
SS9	11.9	27.70	29.43	34.64	39.85	41.58
SS10	12.9	28.75	30.54	35.94	41.35	43.14
SS11	13.9	28.97	30.78	36.23	41.68	43.48
SS12	14.9	29.24	31.06	36.56	42.06	43.88
SS13	15.9	30.68	32.59	38.37	44.14	46.05
SS14	16.9	33.24	35.31	41.56	47.81	49.88
SS15	17.9	34.84	37.00	43.56	50.11	52.28
SS16	18.9	34.93	37.10	43.67	50.25	52.42
SS17	19.9	35.55	37.76	44.45	51.14	53.35

Table 9
Projected savings in makespan for Victoriaville

Speed level	SS (km/h)	Makespan (h)				
		69.1	73.4	86.4	99.4	103.7
SS0	2.9	0	0	0	0	0
SS1	3.9	214.32	227.65	267.97	308.29	321.63
SS2	4.9	288.68	306.64	360.95	415.26	433.23
SS3	5.9	318.38	338.19	398.09	457.99	477.80
SS4	6.9	403.88	429.02	505.00	580.98	606.12
SS5	7.9	430.10	456.86	537.77	618.69	645.45
SS6	8.9	452.71	480.88	566.05	651.22	679.39
SS7	9.9	453.83	482.07	567.46	652.84	681.08
SS8	10.9	460.02	488.65	575.19	661.74	690.36
SS9	11.9	468.01	497.13	585.18	673.23	702.35
SS10	12.9	480.27	510.16	600.51	690.87	720.75
SS11	13.9	498.05	529.04	622.74	716.44	747.43
SS12	14.9	507.50	539.08	634.55	730.03	761.61
SS13	15.9	519.31	551.63	649.32	747.02	779.34
SS14	16.9	527.41	560.23	659.45	758.68	791.50
SS15	17.9	530.90	563.93	663.81	763.69	796.73
SS16	18.9	533.03	566.20	666.49	766.77	799.94
SS17	19.9	534.27	567.52	668.03	768.55	801.79

Table 10
Projected savings in total cost for Victoriaville

Speed level	SS (km/h)	Total cost ($)				
		69.1	73.4	86.4	99.4	103.7
SS0	2.9	0	0	0	0	0
SS1	3.9	168022	178477	210088	241698	252154
SS2	4.9	216015	229457	270097	310737	324179
SS3	5.9	258856	274964	323663	372363	388471
SS4	6.9	348160	369825	435326	500826	522492
SS5	7.9	364653	387345	455948	524551	547243
SS6	8.9	377995	401518	472631	543744	567267
SS7	9.9	380493	404171	475754	547337	571015
SS8	10.9	384442	408365	480691	553018	576941
SS9	11.9	390011	414280	487654	561028	585298
SS10	12.9	397188	421905	496629	571353	596070
SS11	13.9	405918	431178	507545	583912	609171
SS12	14.9	411634	437249	514691	592133	617748
SS13	15.9	419362	445459	524355	603251	629347
SS14	16.9	424526	450944	530811	610679	637097
SS15	17.9	427024	453597	533934	614272	640845
SS16	18.9	453844	482086	567470	652853	681095
SS17	19.9	455116	483437	569059	654681	683003

Some plateaus variations can be observed at certain speed levels (e.g., identical or nearly identical values across consecutive speeds). These effects are mainly due to the heuristic nature of the ALNS algorithm, which relies on stochastic search processes and stopping criteria.

These results confirm that increasing sweeping speed leads to consistent projected savings in terms of working days, makespan and cost. While reductions are most substantial at lower speed increases, continued improvements at higher speeds still offer valuable long-term economic benefits.

4.6.2. Nicolet case study

The results for Nicolet also show a diminishing return pattern as sweeping speed increases (Table 11). The largest improvements occur between SS1 and SS6 (zone of rapid gains), where makespan and total cost reductions reach about 44% and

42% respectively. Beyond SS6 (zone of diminishing but still meaningful gains), gains slow significantly where makespan improves by only 5.1% and cost savings by 3.4%. After SS12 (low-return zone), benefits become marginal, with less than a 2% change in either metric up to SS17. This confirms that most operational efficiencies are achieved at low to moderate speed increases, and higher speeds offer limited additional value.

Table 11
Makespan and total cost reductions for Nicolet

		Nicolet			
Speed level	SS (km/h)	Makespan (h)	Reduction (%)	Total cost ($)	Reduction (%)
SS0	2.9	91.51	0	80598	0
SS1	3.9	72.46	20.82	65663	18.53
SS2	4.9	65.85	28.04	61397	23.82
SS3	5.9	63.21	30.93	57589	28.55
SS4	6.9	55.61	39.23	49651	38.40
SS5	7.9	53.28	41.77	48185	40.22
SS6	8.9	51.27	43.98	46999	41.69
SS7	9.9	51.17	44.08	46777	41.96
SS8	10.9	50.62	44.69	46426	42.40
SS9	11.9	49.91	45.46	45931	43.01
SS10	12.9	48.82	46.65	45293	43.80
SS11	13.9	47.24	48.38	44517	44.77
SS12	14.9	46.40	49.29	44009	45.40
SS13	15.9	45.35	50.44	43322	46.25
SS14	16.9	44.63	51.23	42863	46.82
SS15	17.9	44.32	51.57	42641	47.09
SS16	18.9	44.13	51.77	40257	50.05
SS17	19.9	44.02	51.90	40144	50.19

The results observed in the real case studies of Victoriaville and Nicolet are generally consistent with the patterns found in the randomly generated instances.

Next, the reductions in working days, makespan and total cost were projected over various operational periods to evaluate the financial benefits and overall impact on efficiency. The results are presented in Tables 12 to 14.

Table 12
Projected savings in working days for Nicolet

Speed level	SS (km/h)	Working days (day)				
		69.1	73.4	86.4	99.4	103.7
SS0	2.9	0	0	0	0	0
SS1	3.9	6.83	7.25	8.54	9.82	10.25
SS2	4.9	6.87	7.30	8.59	9.89	10.32
SS3	5.9	13.45	14.29	16.82	19.35	20.18
SS4	6.9	20.58	21.86	25.74	29.61	30.89
SS5	7.9	20.72	22.01	25.91	29.81	31.09
SS6	8.9	21.40	22.73	26.76	30.79	32.12
SS7	9.9	22.16	23.54	27.70	31.87	33.25
SS8	10.9	23.30	24.75	29.13	33.51	34.96
SS9	11.9	24.79	26.33	31.00	35.66	37.20
SS10	12.9	26.10	27.73	32.64	37.55	39.17
SS11	13.9	28.36	30.12	35.46	40.79	42.56
SS12	14.9	30.12	31.99	37.66	43.32	45.20
SS13	15.9	31.13	33.07	38.93	44.79	46.72
SS14	16.9	31.78	33.76	39.74	45.72	47.70
SS15	17.9	32.46	34.48	40.59	46.69	48.71
SS16	18.9	32.66	34.70	40.84	46.99	49.02
SS17	19.9	33.20	35.27	41.52	47.76	49.83

Table 13
Projected savings in makespan for Nicolet

Speed level	SS (km/h)	Makespan (h)				
		69.1	73.4	86.4	99.4	103.7
SS0	2.9	0	0	0	0	0
SS1	3.9	251.66	267.32	314.67	362.02	377.68
SS2	4.9	338.98	360.08	423.85	487.63	508.72
SS3	5.9	373.86	397.13	467.46	537.80	561.06
SS4	6.9	474.26	503.77	593.00	682.22	711.74
SS5	7.9	505.04	536.47	631.49	726.50	757.93
SS6	8.9	531.60	564.68	664.69	764.70	797.78
SS7	9.9	532.92	566.08	666.34	766.60	799.76
SS8	10.9	540.18	573.80	675.42	777.05	810.66
SS9	11.9	549.56	583.76	687.15	790.54	824.74
SS10	12.9	563.96	599.06	705.16	811.26	846.35
SS11	13.9	584.83	621.23	731.25	841.28	877.67
SS12	14.9	595.93	633.02	745.13	857.24	894.33
SS13	15.9	609.80	647.75	762.47	877.20	915.15
SS14	16.9	619.31	657.85	774.37	890.88	929.42
SS15	17.9	623.41	662.20	779.49	896.77	935.57
SS16	18.9	625.92	664.87	782.63	900.38	939.33
SS17	19.9	627.37	666.41	784.44	902.47	941.51

Table 14
Projected savings in total cost for Nicolet

Speed level	SS (km/h)	Total cost ($)				
		69.1	73.4	86.4	99.4	103.7
SS0	2.9	0	0	0	0	0
SS1	3.9	197301	209578	246697	283816	296094
SS2	4.9	253657	269442	317163	364885	380669
SS3	5.9	303963	322879	380064	437250	456165
SS4	6.9	408829	434270	511185	588099	613540
SS5	7.9	428196	454842	535400	615958	642604
SS6	8.9	443864	471485	554990	638496	666117
SS7	9.9	446797	474600	558657	642715	670518
SS8	10.9	451434	479526	564455	649385	677477
SS9	11.9	457973	486472	572632	658792	687291
SS10	12.9	466401	495425	583170	670916	699939
SS11	13.9	476653	506314	595988	685662	715324
SS12	14.9	483364	513443	604379	695316	725395
SS13	15.9	492439	523083	615727	708371	739015
SS14	16.9	498503	529524	623309	717094	748115
SS15	17.9	501436	532639	626976	721313	752517
SS16	18.9	532930	566093	666355	766617	799780
SS17	19.9	534423	567679	668222	768764	802021

The results show that increasing sweeping speed leads to higher projected savings in working days, makespan and operating costs across all operational periods. The largest improvements are observed at low-to-moderate speed increases, particularly between SS0 and approximately SS6, after which gains continue at a slower rate, indicating diminishing marginal improvements at higher speeds.

For the service providers, this analysis highlights that investing in brushes capable of operating between SS6 and SS12 provides the best balance between cost efficiency, operational feasibility and contract competitiveness. Beyond this range, diminishing returns reduce the attractiveness of further speed increases. Additionally, ensuring debris collection quality at higher speeds requires more advanced brushes which are not yet available on the market from specialized component suppliers. Upgrading to higher-performing equipment within the optimal speed range can

enhance contract execution efficiency, reduce operational costs and strengthen competitive positioning without unnecessary expenditure on excessive speed enhancements.

5. DISCUSSION

This section introduces a generic framework for evaluating technological innovations and their operational and economic impacts. It also discusses the managerial insights and the limits of this study.

5.1. A generic decision-support framework for technological innovation assessment

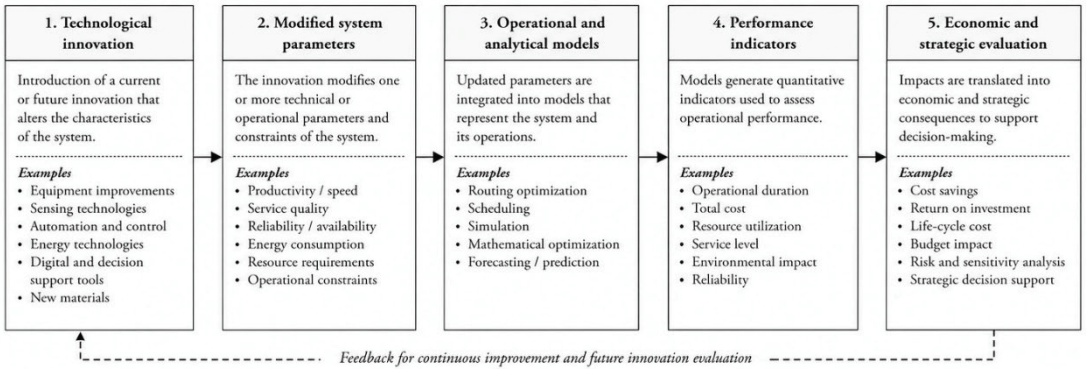
The results provide a quantitative evaluation of the impact of sweeping speed on makespan, total operating cost, and the number of shifts. Increasing sweeping speed leads to significant reductions in these performance indicators, with the largest gains observed at low-to-moderate speeds. The analysis also shows that projected savings over a full operational period can be substantial. However, these results are conditional on maintaining acceptable cleaning quality at higher speeds.

Beyond the specific case of sweeping brushes, the results also support the formulation of a generic framework for evaluating technological innovations in street sweeping and related municipal service operations (Figure 5). Previous studies mainly focused either on technical equipment performance or routing optimization under fixed operating conditions. In contrast, the proposed analytical framework explicitly links technological characteristics, operational planning parameters and economic outcomes within a unified decision-support structure.

In the present study, the innovation concerns increased sweeping speed enabled by higher-performance brushes. However, the framework is intentionally designed to

remain transferable to other current or future innovations, including the different categories of innovations identified in Table I, such as vacuum systems, sensing technologies, energy-management systems or autonomous operational technologies. The general logic of the framework consists in integrating modified technical parameters into routing and planning models in order to evaluate their operational and economic impacts at the system level. Consequently, the contribution of this work extends beyond the analysis of sweeping-speed scenarios by proposing a first stepwise analytical framework capable of supporting ex-ante evaluation of technological innovations in municipal service operations.

Figure 5
A generic decision-support framework for technological innovation assessment



5.2. Managerial implications and limitations

From a managerial perspective, the results suggest that intermediate speed ranges offer a balance between performance improvements and operational constraints. The framework used in this study allows the evaluation of different speed scenarios and their impact on operational performance, providing quantitative inputs that can support decision-making.

Several limitations should be noted. First, cleaning quality is not explicitly modeled and is only considered indirectly through assumptions based on the

literature. Second, the highest speed scenarios can be considered partially exploratory and may not be fully achievable under real operating conditions. Third, the investment cost of higher-performance brushes is not explicitly modeled, and therefore no direct assessment of return on investment is provided. Finally, the proposed framework could be extended to other technological innovations in municipal service operations.

6. CONCLUSION

This study evaluates the effect of sweeping speed on operational performance and cost in street sweeping operations. By testing speeds ranging from 2.9 km/h to 19.9 km/h, the results show that increasing sweeping speed reduces makespan, total cost, and the number of shifts, with diminishing returns at higher speeds. The analysis also includes projections of these reductions over a full operational period, providing an estimate of potential savings under different speed scenarios. These results offer quantitative insights into the relationship between sweeping speed and operational efficiency, under the assumption that acceptable cleaning quality is maintained. Beyond the specific case of sweeping brushes, this study contributes by proposing a generic framework for evaluating technological innovations in street sweeping and related operational systems. The proposed approach links technological characteristics, operational planning, performance indicators and economic outcomes within a unified decision-support structure. Future research could integrate cleaning-quality evaluation, stochastic operational factors and additional technological innovations to further refine and validate the proposed framework.

Acknowledgments

This work was supported by Mitacs Accelerate under Grant (IT45080). This support is gratefully acknowledged.

Disclosure of interest

The authors report there are no competing interests to declare.

References

Amato, F., Querol, X., Johansson, C., Nagl, C. and Alastuey, A. (2010), "A review on the effectiveness of street sweeping, washing and dust suppressants as urban PM control methods", Science of The Total Environment, Elsevier, Vol. 408 No. 16, pp. 3070–3084, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2010.04.025.

Cinar, E., Trott, P. and Simms, C. (2019), "A systematic review of barriers to public sector innovation process", Public Management Review, Routledge, Vol. 21 No. 2, pp. 264–290, doi: 10.1080/14719037.2018.1473477.

Cinar, E., Trott, P. and Simms, C. (2021), "An international exploration of barriers and tactics in the public sector innovation process", Public Management Review, Routledge, Vol. 23 No. 3, pp. 326–353, doi: 10.1080/14719037.2019.1668470.

Conti, E. and Chiarini, A. (2021), "Design-driven innovation: exploring new product development in the home appliances and furniture industry", The TQM Journal, Emerald Group Holdings Ltd., Vol. 33 No. 7, pp. 148–175, doi: 10.1108/TQM-12-2020-0313.

Das, S. and Wiseman, C.L.S. (2024), "Examining the effectiveness of municipal street sweeping in removing road-deposited particles and metal(loid)s of respiratory health concern", Environment International, Pergamon, Vol. 187, pp. 108–697, doi: 10.1016/J.ENVINT.2024.108697.

Daya, B. Ben, Audy, J.F. and Lamghari, A. (2022), "Characterization of the Spatiotemporal Behavior of a Sweeping System Using Supervised Machine Learning Enhanced with Feature Engineering", IFIP Advances in Information and Communication Technology, Springer, Cham, Vol. 662 IFIP, pp. 245–261, doi: 10.1007/978-3-031-14844-6_20.

Ben Daya, B., Audy, J.F. and Lamghari, A. (2024), "Real-World Data Simulation Comparing GHG Emissions and Operational Performance of Two Sweeping Systems", Logistics 2024, Vol. 8, Page 120, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Vol. 8 No. 4, p. 120, doi: 10.3390/LOGISTICS8040120.

Donati, L., Fontanini, T., Tagliaferri, F. and Prati, A. (2020), "An Energy Saving Road Sweeper Using Deep Vision for Garbage Detection", Applied Sciences 2020, Vol.

10, Page 8146, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Vol. 10 No. 22, p. 8146, doi: 10.3390/APP10228146.

Environment Canada. (2007), "Effectiveness of street sweeping in stormwater pollution source control : interim report : summary of the 2004 & 2005 field seasons, Markham Road, Toronto", National Water Research Institute, 5 January, available at: https://publications.gc.ca/site/eng/9.875919/publication.html (accessed 2 July 2025).

Fayzullayevich, J.V., Tan, G., Alex, F.J., Wu, Y. and Agyeman, P.K. (2022), "Numerical Study of Factors Affecting Particle Suction Efficiency of Pick-Up Head of a Regenerative Air Vacuum Sweeper", Processes 2022, Vol. 10, Page 1252, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Vol. 10 No. 7, p. 1252, doi: 10.3390/PR10071252.

Guedes, M., Pires, J.C.M., Martins, F.G., Lucas, C.S., Claro, H., Pereira, M.F.R. and Dias, J.M. (2025), "Development of a tool to enhance street cleaning service efficiency: The case study of Porto city, Portugal", Waste Management and Research, SAGE Publications Ltd, doi: 10.1177/0734242X251387004.

Jeong, C.H., Fang, C. and Evans, G. (2025), "Spatial variation of resuspended particulate matter in urban environments and real-world assessment of street sweeping", Environmental Pollution, Elsevier, Vol. 373, pp. 126–165, doi: 10.1016/J.ENVPOL.2025.126165.

Kraiem, A., Audy, J.-F. and 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, Taylor & Francis, pp. 1–19, doi: 10.1080/01605682.2024.2432605.

Kraiem, A., Audy, J.F. and Lamghari, A. (2025), "Mixed integer linear programming model for a multi-depot arc routing problem with different arc types and flexible assignment of end depot", Transportation Research Procedia, Elsevier B.V., Vol. 82, pp. 1109–1119, doi: 10.1016/j.trpro.2024.12.115.

Lamghari, A., Foutlane, O. and Audy, J.F. (2025), Decomposition Strategies for Solving the Spring Sweeping Routing Problem.

Liu, G., Yang, H., Zhao, H. and Zhiwei, D.W. (2024), "A Two-stage heuristic framework for location-arc routing optimization for a fleet of street sweepers", Proceedings of the IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, CIS, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., No. 2024, pp. 168–173, doi: 10.1109/CIS-RAM61939.2024.10673198.

Liu, W. and Lai, X. (2025), "Integrating decision tools for efficient operations management through innovative approaches", Scientific Reports, Nature Research, Vol. 15 No. 1, pp. 1–19, doi: 10.1038/S41598-025-99022-8.

Milijaš, R., Peti, M., Stuhne, D., Vasiljević, G., Kovačić, Z. and Mader, M. (2023), "Towards an Environmentally-friendly Street Sweeping Vehicle with Reduced Water Consumption", 4th International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering, ICECCE 2023, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., doi: 10.1109/ICECCE61019.2023.10442147.

Mokhbi, S., Assaf, G.J. and 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, Canadian Science Publishing, Vol. 44 No. 4, pp. 286–297.

OECD. (2015), The Innovation Imperative in the Public Sector: Setting an Agenda for Action, The Innovation Imperative in the Public Sector, OECD, Paris, doi: 10.1787/9789264236561-EN.

Pan, J., Ye, J., Ai, H., Wang, J. and Wan, Y. (2023), "Parameter optimization of a pure electric sweeper dust port by a backpropagation neural network combined with a whale algorithm", Mechanical Sciences, Copernicus Publications, Vol. 14 No. 1, pp. 47–60, doi: 10.5194/MS-14-47-2023.

Parsons, T., Baghyari, F., Seo, J., Kim, W. and Lee, M. (2024), "Advanced Path Planning for Autonomous Street-Sweeper Fleets under Complex Operational Conditions", Robotics 2024, Vol. 13, Page 37, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Vol. 13 No. 3, p. 37, doi: 10.3390/ROBOTICS13030037.

Parsons, T., Seo, J. and Livesey, D. (2025), "Municipal street-sweeping area generation with route optimization", International Transactions in Operational Research, John Wiley and Sons Inc, Vol. 32 No. 3, pp. 1375–1399, doi: 10.1111/ITOR.13515.

Pisinger, D. and Ropke, S. (2010), Large Neighborhood Search, Springer, Boston, MA, doi: 10.1007/978-1-4419-1665-5_13.

Polukarova, M., Markiewicz, A., Björklund, K., Strömvall, A.M., Galfi, H., Andersson Sköld, Y., Gustafsson, M., et al. (2020), "Organic pollutants, nano- and microparticles in street sweeping road dust and washwater", Environment International, Pergamon, Vol. 135, pp. 105–337, doi: 10.1016/J.ENVINT.2019.105337.

Rubio-Calderón, L.C., Zafra-Mejía, C.A. and Rondón-Quintana, H.A. (2025), "Dynamic Simulation Model for Urban Street Sweeping: Integrating Performance and Citizen Perception", Urban Science, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), Vol. 9 No. 12, p. 518, doi: 10.3390/urbansci9120518.

Silva, A.S., Medeiros, C.F. and Vieira, R.K. (2017), "Cleaner Production and PDCA cycle: Practical application for reducing the Cans Loss Index in a beverage company", Journal of Cleaner Production, Elsevier, Vol. 150, pp. 324–338, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2017.03.033.

Strand, M., Syberfeldt, A. and Geertsen, A. (2020), "A decision support system for sustainable waste collection", in Information Resources Management Association (Ed.), Waste Management: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications, Vol. 3, pp. 347–365.

Wang, H., Wang, C., Ao, Y. and Zhang, X. (2025), "Fuzzy control algorithm of cleaning parameters of street sweeper based on road garbage volume grading", Scientific Reports 2025 15:1, Nature Publishing Group, Vol. 15 No. 1, pp. 1–18, doi: 10.1038/s41598-025-92771-6.

Washington Stormwater Center. (2026), "Chapter 5 – Optimizing Street Sweeping Practices ", Street Sweeping Manual , pp. 1–27.

Yang, Q., Su, Q. and Capaldo, A. (2026), "How does innovation affect performance in the supply chain? The mediating roles of supply chain collaboration and digital transformation", The TQM Journal, Emerald Publishing, Vol. 38 No. 11, pp. 74–103, doi: 10.1108/TQM-07-2025-0419.

4.3. ARTICLE 3

Le troisième article, intitulé « Quantifying the minimum cost premium for eco-innovation under different green public procurement models», est cosigné avec les professeurs Audy et Lamghari, et a été soumis le 4 mai 2026 au journal *Environmental Management: Economics and Policy*. La version insérée dans cette thèse est identique à celle soumise. Le titre et le résumé en français de l'article sont indiqués ci-dessous.

Titre : Quantification du surcoût minimum associé à l'éco-innovation selon différents modèles de marchés publics verts.

Résumé : Les MPV impliquent que les autorités publiques intègrent des critères environnementaux à côté des critères économiques dans le processus d'attribution des contrats. Toutefois, les données empiriques demeurent limitées quant à la manière dont ces critères sont concrètement intégrés dans les pratiques d'achat public et quant à leurs effets sur la compétitivité des fournisseurs qui investissent dans l'éco-innovation. Cette question se pose notamment lorsque de meilleures performances environnementales peuvent amener les autorités publiques à payer un surcoût par rapport à des offres conventionnelles. Dans ce contexte, cette étude propose et analyse différents modèles de MPV afin d'évaluer leur influence sur le surcoût minimum qu'une autorité publique peut payer pour valoriser une performance environnementale supérieure. L'analyse repose sur l'application de plusieurs modèles paramétrés de MPV à un cas réel de balayage urbain, en comparant des soumissions dont l'une intègre une éco-innovation. Les performances économiques et environnementales des offres sont évaluées à l'aide de la métaheuristique RAGV. Les résultats montrent que le surcoût dépend directement du modèle de MPV utilisé. Lorsque le poids accordé aux critères environnementaux est faible, ce surcoût atteint 3,29 %, alors qu'il peut s'élever jusqu'à 40,85 % lorsque la performance environnementale devient un critère dominant d'adjudication. Dans l'ensemble, cette recherche propose un cadre analytique permettant de quantifier l'effet des différents modèles de MPV sur le surcoût minimum.

ARTICLE 3: QUANTIFYING THE MINIMUM COST PREMIUM FOR ECO-INNOVATION UNDER DIFFERENT GREEN PUBLIC PROCUREMENT MODELS

Ameni Kraiem[a]*, Jean-François Audy[a,b] and Amina Lamghari[a,c]

[a]Department of Management, Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, QC G8Z 4M3, Canada; [b]Interuniversity Research Center on Enterprise Networks, Logistics and Transportation (CIRRELT), Montréal, QC H3T 1J4, Canada; [c]Group for Research in Decision Analysis (GERAD), Montréal, QC H3T 1N8, Canada

*Corresponding author: ameni.kraiem@uqtr.ca

Abstract

Green public procurement (GPP) requires public authorities to integrate environmental criteria alongside economic criteria in decision-making when awarding a contract to a selected supplier. Yet, empirical evidence remains scarce on how public authorities operationally integrate environmental criteria into green public procurement and, consequently, how this integration affects the competitiveness of suppliers investing in eco-innovation. In particular, this occurs when superior environmental performance may lead public authorities to determine a minimum cost premium when awarding contracts compared to conventional bids. This study develops and evaluates how different GPP models influence the minimum cost premium that a public authority may reward to a supplier's superior environmental performance. The analysis applies multiple parameterized GPP models to real urban street cleaning case studies, comparing suppliers in which one bid includes an eco-innovation. The economic and environmental performance of both submissions is assessed through an ALNS-based routing framework. The study tests how different GPP models, such as preferential margins, dynamic bonuses, carbon-pricing-related adjustments, and dynamic weighting schemes, translate superior environmental performance into procurement cost differentials. Results show that the cost premium depends directly on GPP models. Under low weighting of environmental criteria, the premium is 3.29%. When

preferential margins make environmental performance the dominant award criterion, the premium increases to 40.85%. Overall, the study provides an analytical framework that quantifies how different GPP models influence the minimum cost premium that public authorities may pay to secure superior environmental performance in purchased goods or services.

Keywords

Green public procurement models, eco-innovation, environmental criteria, greenhouse gas emissions, cost premium, economic-environmental trade-off, adaptive large neighbourhood search.

1. INTRODUCTION

At the global level, public procurement accounts for a substantial share of government expenditure, representing approximately 10 to 15% of GDP in developed economies (OECD, 2025). Given its economic magnitude, procurement activity significantly influences both economic performance and environmental sustainability. Traditionally, contract awards have been guided by the lowest-price criterion, prioritizing immediate cost savings, often at the expense of environmental considerations and suppliers' ability to obtain a price premium that rewards superior environmental performance and supports eco-innovation investment (Krieger and Rainville, 2026; Ortega Carrasco et al., 2025). While this approach may yield short-term financial benefits, it can also generate considerable long-term social and environmental costs.

In response to these limitations, green public procurement (GPP) has emerged as a strategic policy instrument that incorporates environmental criteria into purchasing procedures to better align economic and environmental objectives (Yang and Morotomi, 2025). GPP enables the evaluation of suppliers based on environmental dimensions such as greenhouse gas (GHG) emissions, resource efficiency, life cycle

impacts and eco-innovation capabilities. By broadening the evaluation criteria beyond price alone, this approach encourages firms to adopt more sustainable practices and supports the development and diffusion of cleaner and more innovative technologies (Krieger and Zipperer, 2022). Furthermore, GPP is consistent with increasingly stringent international climate commitments aimed at reducing the environmental footprint of public sector activities (European Commission, 2019).

Despite growing policy interest, empirical evidence remains limited regarding the actual effects of GPP on the development of supplier eco-innovations, the overall efficiency of public procurement, and the trade-offs public authorities can make between economic and environmental objectives when innovation is involved (Yang and Morotomi, 2025). Recent studies emphasize the difficulty of fostering eco-innovation within contexts characterized by strong price competition and heightened environmental performance requirements (Treviño-Lozano et al., 2021). Moreover, although the literature frequently advocates for the integration of environmental criteria into public tenders, it often remains prescriptive and provides limited guidance on their practical implementation. Many contributions recommend adopting ecological standards and sustainability benchmarks without specifying how these criteria should be operationalized within the modes of contract adjudication used in public procurement. The absence of such analytical framework constrains understanding of how GPP influences supplier competitiveness, innovation capacity and the budgetary constraints faced by contracting authorities.

There is therefore a need to develop analytical tools capable of quantifying these additional criteria to support evidence-based procurement decisions that address the trade-off between environmental requirements and economic objectives. In this context, the present study introduces an analytical framework comprising different GPP models that integrate economic and environmental dimensions. The purpose of the study is to formalize and analyze these models within a specific application setting, with the objective of determining the minimum cost premium that a public authority

may be willing to pay to reward superior environmental performance for the product or service purchased. This premium is intended to reward suppliers' eco-innovations that generate environmental benefits exceeding those associated with conventional offers. Importantly, public authorities are generally unwilling to pay a significant cost premium when the environmental gains of the eco-innovation are marginal, as this would not provide meaningful environmental benefits relative to the cost premium.

Through the evaluation of various parameters and scenarios, the study investigates how different GPP models influence the minimum cost premium and public purchasing decisions. It highlights the effects of tender structure on the additional cost, the competitiveness of eco-innovative suppliers and the broader role of GPP as a mechanism for stimulating eco-innovation.

The remainder of the paper is organized as follows. Section 2 reviews the literature on green public procurement and eco-innovation and identifies existing research gaps. Section 3 presents the methodological framework, including the proposed GPP models and the optimization tool. Section 4 reports the case studies results, while Section 5 discusses managerial implications for public authorities and suppliers. Finally, Section 6 concludes by summarizing the main contributions and outlining directions for future research.

2. LITERATURE REVIEW

Most prior research has examined the relationship between green public procurement (GPP) and economic performance as well as sustainability objectives (Ortega Carrasco et al., 2025). For instance, Orfanidou et al. (2023) showed that the effective integration of environmental criteria depends on coordination among stakeholders to secure positive economic outcomes. Rainville (2022) found that GPP-related standards can serve as practical instruments for advancing sustainable development goals. Wang & Shen (2025) demonstrated that participation in GPP

improves firms' environmental, social, and governance performance. Similarly, Lagström & Ek Österberg (2025) identified GPP as a key policy lever within broader sustainable development strategies. A substantial body of work has also documented the environmental benefits of GPP, particularly in terms of greenhouse gas emission reductions and energy efficiency gains (Alvarez & Rubicon, 2015; Chiappinelli & Seres, 2024; Tsai, 2017; Xu et al., 2016; Zhang & Jiang, 2022). Other contributions emphasized the strategic dimension of public procurement, encouraging contracting authorities to incorporate sustainability considerations (Guarnieri and Gomes, 2019), identifying drivers and barriers to GPP adoption (Chersan et al., 2020) and examining implementation challenges, regulatory frameworks and effectiveness issues (Cheng et al., 2018). For example, Singh et al. (2024) developed a framework to identify, prioritize, and analyze interrelationships among drivers of GPP adoption in public sector organizations. Zhang & Zhu (2025) found that GPP shifts firms' environmental investments toward source prevention, especially under procurement risks, green investor pressure, subsidy opportunities, aligned governance, and strong competition.

Despite this expanding literature, empirical evidence regarding the specific impact of GPP on eco-innovation remains comparatively limited (Yang and Morotomi, 2025). Krieger & Zipperer (2022) found that firms particularly small and medium-sized enterprises (SMEs) that win GPP contracts are more likely to innovate subsequently. However, their analysis focuses exclusively on contract winners and does not explore the selection mechanisms that determine how innovative suppliers compete under financial constraints and innovation costs. Bryngemark et al. (2023) argued that public purchasing power can enhance the competitiveness of innovative suppliers, thereby fostering eco-innovation. GPP can influence public authorities to adopt more sustainable procurement behavior, generating demand for eco-innovation. Competitive tendering processes may also stimulate innovation by intensifying rivalry among suppliers (Yang and Morotomi, 2025). Rainville (2017) examined how standards embedded in GPP frameworks can promote innovation, while Morley (2021) highlighted the role of public procurement strategies in supporting sustainable

transitions in the food sector. Deambrogio et al. (2017) provided empirical evidence that public purchasing of innovative solutions can improve energy performance. Sönnichsen & Clement (2020) called for further research on sustainable transitions, noting the limited evidence on how innovation enhances operational efficiency and environmental performance. Yang & Morotomi (2025) further suggested that GPP stimulates eco-innovation most effectively when the share of green contracts exceeds a certain threshold and when firms possess substantial intellectual capital. They recommend that public authorities move beyond existing standards in designing environmental criteria, explicitly rewarding innovative practices. They also stress the importance of defining measurable criteria to enable comparison of bids across environmental and economic dimensions. Zheng & Wen (2024) found that firms participating in green contracts exhibit improved environmental management and performance, recommending enhanced transparency, administrative efficiency and contractual stability to strengthen environmental incentives, particularly for SMEs. Han et al. (2024) underlined the lack of standardization in defining and weighting environmental criteria, as well as insufficient coordination among stakeholders to ensure measurable environmental outcomes. Caruana & Vassallo (2024) investigated implementation challenges faced by public procurement managers, showing that cultural and organizational factors significantly influence GPP adoption. They also note the absence of standardized environmental criteria, limited empirical evidence and weak monitoring of outcomes. More recently, Lichère (2025) provided a comparative analysis of legal frameworks and implementation practices across six European and North American countries, highlighting the practical complexity of drafting, weighting and monitoring environmental clauses. The study also observes that penalties for environmental non-compliance are rarely applied, as they may discourage supplier participation. Conversely, some jurisdictions favor incentive-based mechanisms, such as preferential margins reaching up to 10% in certain regulatory frameworks applicable to services in Quebec or the allocation of specific weights to environmental criteria, typically ranging from 5% to 30% in bid evaluation. The authors recommend strengthening performance measurement tools and further exploring interactions

between GPP and other public policy objectives, including eco-innovation, social inclusion and market competitiveness. Liu et al. (2021) argued that effective environmental legislation, combined with reward and recognition mechanisms for compliance, reinforces the adoption of GPP practices. National sustainability targets also act as important incentives (Lindfors and Ammenberg, 2021).

At the same time, the implementation of GPP is closely linked to budgetary management and procurement strategy. Public authorities often favor the lowest short-term cost offers, which tend to be less environmentally ambitious. Major barriers to GPP therefore include perceptions of higher costs, the absence of standardized environmental criteria and the lack of practical decision-support tools (Sapir et al., 2022). Leal et al. (2020) showed that frequent low-value routine purchases reduce the likelihood of adopting green procurement practices. Budget constraints represent an additional obstacle, limiting resource allocation and support for GPP initiatives (Ahsan and Rahman, 2017). Financial restrictions may hinder implementation, particularly when economic priorities outweigh environmental or social considerations (Treviño-Lozano et al., 2021).

Overall, while the literature frequently recommends that contracting authorities incorporate general guidance such as environmental standards, technical specifications, performance criteria or incentive mechanisms into tender documents, it rarely details how these guidelines are operationalized into GPP models. The central challenge lies in designing procurement models that simultaneously integrate economic and environmental considerations while effectively rewarding eco-innovation. This requires formalized and parameterized models of GPP, incorporating weightings, preferential margins, penalties and incentives. The objective is to provide an economic justification for awarding contracts to higher-priced but more environmentally responsible suppliers and to determine how such cost differentials can be structured transparently and competitively within tender procedures.

Table 1 summarizes the different GPP classifications identified in the literature such as environmentally based technical specifications and standards (GPP 1), weighting of environmental performance criteria (GPP 2), incentive mechanisms such as preferential margins (GPP 3), bonuses designed to offset initial eco-innovation adoption costs (GPP 4), bonuses or penalties directly tied to environmental performance (GPP 5), dynamic weighting in which coefficients progressively evolve over time to reflect increasing environmental requirements (GPP 6) and monitoring and control mechanisms (GPP 7).

Table 1
Classification et critical analysis of GPP

GPP	Description	Advantages	Limits	References
1	-Minimum emission performance requirement (percentage or fixed threshold) -Mandatory environmental certificates or official compliance declarations -Requirement to use cleaner and innovative technologies	-Easy to implement -Ensures a minimum environmental standard	-Rigid structure: only suppliers meeting the threshold remain eligible, potentially excluding firms that are close to compliance	(Ahmed et al., 2024; EU, 2022; OECD, 2024)
2	-Integration of environmental criteria with an explicit evaluation weight	-Enables balancing cost and environmental performance -Adaptable across different procurement contexts	-Difficulty in defining transparent and scientifically justified weights between cost and environmental impact	(EU, 2022; Menon and Ravi, 2022; OECD, 2024; Testa et al., 2016)
3	-Application of preferential margins favoring eco-innovative bids	-Provides short-term protection for innovative firms	-Effectiveness depends on market competition	(Chiappinelli and Seres, 2024;

			intensity and price dispersion among bidders	Lichère, 2025)
4	-Specific bonuses or financial cost-spreading mechanisms to offset additional eco-innovation expenses	-Encourages early-stage eco-innovation	-Suppliers not benefiting from the bonus may perceive the mechanism as unfair or discriminatory	(EU, 2022; OECD, 2024; Oz, 2024; Scherz et al., 2023)
5	-The contracting authority sets an environmental target (e.g., X tons of CO_2) and applies a bonus or penalty depending on actual performance	-Strong and measurable incentive structure	-Complex calibration of performance coefficients	(Caruana and Vassallo, 2024; EU, 2022; Scherz et al., 2023)
6	-Weighting coefficients evolve over time according to a learning or adjustment function	-Gradual implementation -Facilitates SME adaptation -Greater social acceptability	-Requires multi-year planning and continuous regulatory monitoring	(Su et al., 2019)
7	-Implementation of quality control and environmental monitoring tools (e.g., audits) -Definition of penalty clauses in cases of non-compliance -Inclusion of revision clauses based on observed outcomes	-Tracks actual environmental performance -Enhances transparency	-Measurement of real emission gaps can be complex and costly -Data variability -Lack of harmonized monitoring tools	(EU, 2022; IISD, 2024; Lichère, 2025; OECD, 2024)

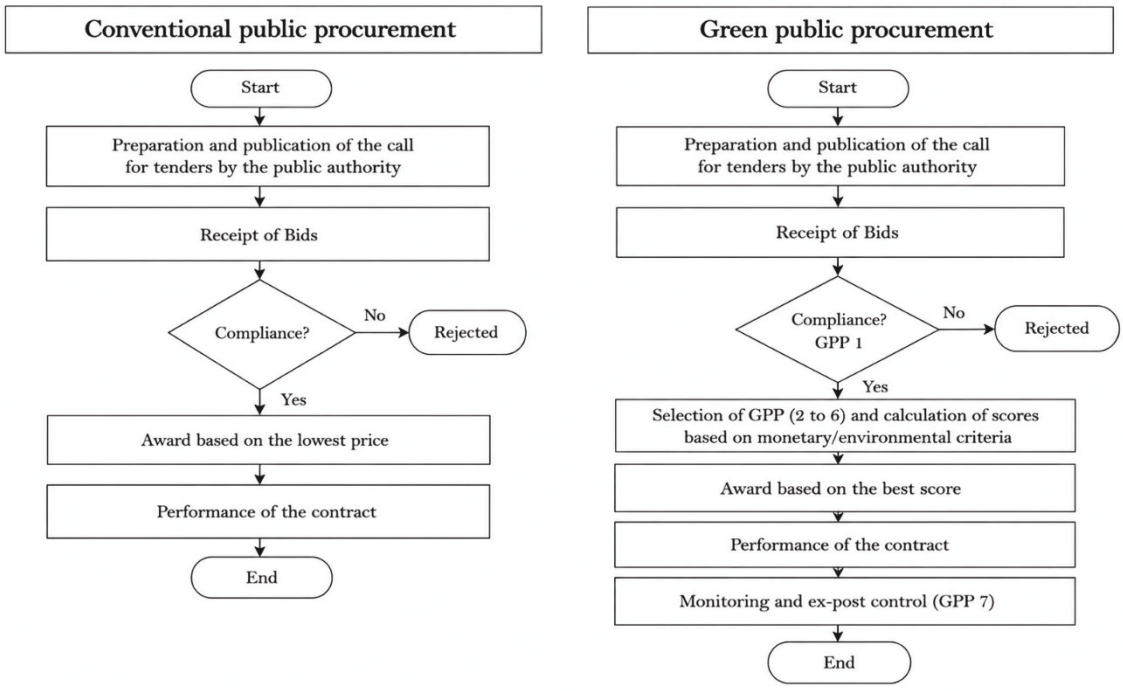
3. METHODOLOGY

3.1. Contract award process

Figure 1 illustrates the contract award process depending on the procurement type. In both cases, the public authority follows the same initial administrative steps such as preparation of the tender documents, submission of bids and verification of

compliance. The divergence occurs at the evaluation stage. Under conventional procurement, the contract is awarded to the supplier offering the lowest price. In contrast, green public procurement relies on an adjudication mode that integrates price and environmental performance. The different models (GPP 1 to GPP 6) enable a multicriteria comparison of offers and explicitly reward eco-innovation. The final step consists of monitoring and verification (GPP 7) during contract execution to ensure compliance with environmental commitments. This control phase is essential for maintaining the credibility and effectiveness of the incentive framework. The transition toward green public procurement therefore does not fundamentally alter the administrative structure of the purchasing process. Rather, it transforms the award logic by integrating cost and environmental performance into the evaluation stage.

Figure 1
Contract award process.



3.2. Formulation of GPP Models

In this study, seven GPP were formalized using models derived from various applied contexts, particularly in the construction sector (Ahmed et al., 2024; Scherz et al., 2023; Su et al., 2019). Additional formulations were developed based on explicit mechanisms described in institutional reports from the European Union, the OECD and the International Institute for Sustainable Development (IISD), which outline commonly implemented GPP practices.

This combined approach ensures both methodological consistency and practical representativeness of the main GPP observed in real-world procurement systems. Each GPP model is presented with its mathematical formulation, structured to incorporate multiple environmental cost-type criteria (e.g., CO_2 emissions, energy consumption, waste generation) alongside the financial cost associated with supplier i. All variables are normalized to facilitate comparability across suppliers and to ensure fairness in the evaluation process.

3.2.1. Notation

- Sets and indices
  K ={k∈ IN^* } : set of environmental criteria considered

  I ={i=1,…,m} : set of eligible suppliers

  $I^{ne} = \{i \notin I\}$: set of non-eligible suppliers
- Cost parameters
  C_i : cost (in $) of eligible supplier $i \in I$

  C_i^{ne} : cost (in $) of non-eligible supplier $i \in I^{ne}$

  $C_{min} = min_{i \in I} C_i$: minimum cost among eligible suppliers

  $C_{max} = max_{i \in I} C_i$: maximum cost among eligible classical suppliers

  $C_{min}^{ne} = min_{i \in I^{ne}} C_i^{ne}$: minimum cost among non-eligible suppliers
- Environmental performance parameters
  E_{ik} : value of environmental criterion $k \in K$ for supplier i

$E_{k,min} = min_{i \in I} E_{ik} \ \forall k \in K$: minimum value of criterion k among suppliers

$E_{k,max} = max_{i \in I} E_{ik} \ \forall k \in K$: maximum value of criterion k among suppliers

- Weights and incentive mechanisms

w_C : weight assigned to cost criteria

w_k : weight assigned to environmental criterion k

w_k^0 : initial weight of criterion k

w_k^{max} : maximum weight of criterion k

α : preferential margin (%)

b_0 : initial bonus

λ: bonus decay rate

t : evaluation period

δ : eco-innovation bonus (%)

T_k : environmental target for criterion k ($t\ CO2eq$)

z_k : shadow price associated with criterion k ($\$/t\ CO2eq$)

β_k : penalty coefficient ($\$/t\ CO2eq$)

λ_1: environmental weight increase rate

$Score_i$: score of supplier i

M_k : maximum admissible threshold for environmental criterion k

3.2.2. GPP models

- GPP 1 – Eligibility threshold

GPP 1 defines a maximum threshold M_k for each environmental criterion k. Suppliers exceeding this limit are excluded from further evaluation. Remaining suppliers are subsequently assessed under one of the following GPP models.

$$Score_i = \begin{cases} 1 \ if \ E_{ik} < M_k \ \forall \ k \\ 0 \quad else \end{cases} \quad (1)$$

- GPP 2 – Multi-criteria weighting

GPP 2 combines cost and environmental criteria under a weighted sum method where $w_C + \sum_{k=1}^{n} w_k = 1$. This structure allows multiple objectives to be integrated and their relative importance to be adjusted.

$$Score_i = w_C \frac{C_{max} - C_i}{C_{max} - C_{min}} + \sum_{k=1}^{n} w_k \frac{E_{k,max} - E_{ik}}{E_{k,max} - E_{k,min}} \quad (2)$$

- GPP 3 – Preferential margin

GPP 3 applies an artificial reduction α (preferential margin) to the submitted cost C_i of innovative supplier.

$$C_i' = \begin{Bmatrix} C_i(1-\alpha)\ if\ i\ is\ innovative \\ C_i \quad else \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$Score_i = w_C \frac{C_{max} - C'_i}{C_{max} - C_{min}} + \sum_{k=1}^{n} w_k \frac{E_{k,max} - E_{ik}}{E_{k,max} - E_{k,min}} \quad (4)$$

- GPP 4 – Time-decreasing bonus

The objective of this GPP is to model a lump-sum support mechanism that decreases over time, independently of actual or anticipated environmental performance. For example, it may serve to offset the initial cost of adopting an eco-innovation over several years, without directly linking the support to the environmental gain achieved. The innovative supplier receives a bonus added to its $Score_i$, which declines over time (e.g., a partial subsidy over 2–3 years), where b0 represents the initial bonus and λ the decay rate. Score evaluation is performed at each evaluation period t.

$$Score_i = \frac{C_{max} - C_i}{C_{max} - C_{min}} + b_0 exp^{-\lambda t} \quad (5)$$

- GPP 5– Performance-based bonus and penalty

Under GPP 5, the bonus is directly linked to environmental performance (eco-innovation). Initially, the innovator's price is reduced through an eco-innovation bonus determined by public policy. Subsequently, this price is further adjusted according to each unit of environmental improvement achieved relative to the target T_k, multiplied by the corresponding shadow price z_k for the evaluation period.

Conversely, if a supplier exceeds (i.e., performs worse than) the environmental target, its bid is penalized proportionally using a penalty coefficient β_k.

$$\text{Corrected cost } C_i' = \begin{cases} C_i(1-\delta) - \sum_{k=1}^{n} z_k(T_k - E_{ik}) & si\ E_{ik} \le T_k \\ C_i + \sum_{k=1}^{n} \beta_k(E_{ik} - T_k) & si\ E_{ik} > T_k \end{cases} \quad (6)$$

$$Score_i = \frac{C_{max} - C'_i}{C_{max} - C_{min}} \quad (7)$$

- GPP 6- Dynamic weighting

GPP 6 progressively increases the environmental weight $w_k(t)$ over time. This gradual approach helps to support suppliers towards the green transition.

$$w_k(t) = w_k^0 + (w_k^{max} - w_k^0)\left(1 - exp^{-\lambda_1 t}\right) \quad (8)$$

$$w_c(t) = 1 - w_k(t) \quad (9)$$

$$Score_i = w_C(t)\frac{C_{max} - C_i}{C_{max} - C_{min}} + \sum_{k=1}^{n} w_k(t)\frac{E_{k,max} - E_{ik}}{E_{k,max} - E_{k,min}} \quad (10)$$

- GPP 7- Monitoring and ex-post control

Under GPP 7, post-award controls are conducted and penalties β_k applied if actual performance deviates from declared commitments.

$$Penalty\ P_i = \sum_{k=1}^{n} \beta_k * \max\left(0, E_{ik,real} - E_{ik}\right) \quad (11)$$

3.2.3 Parameter selection

For the sake of brevity, in this study the environmental criterion considered corresponds to greenhouse gas emissions (k = 1). However, the analytical framework can be extended to several environmental criteria and their aggregation, without affecting the theoretical or practical applicability of the proposed GPP models. Table 2 summarizes the parameters used in the GPP models and their values as reported in the literature.

Table 2
Parameters used in the GPP models.

Parameters	GPP	Values	References
α	GPP3	$\alpha \in [0.05, 0.1]$	(Lichère, 2025)
w_C, w_1	GPP2, GPP3	$w_C = 0.7,\ w_1 = 0.3$	(Braulio-Gonzalo and Bovea, 2020; Lichère, 2025)
b_0	GPP4	$b_0 = 0.1$	(Chiappinelli and Seres, 2024)
λ, T, t	GPP4	$\lambda = \frac{\ln(2)}{T}$, T={1.5, 2, 4}, $t \in [0,5]$	(Oz, 2024; Zhang et Jiang, 2022)
z_k	GPP5	$z_1 = [130, 400\$/t\ CO2eq]$	(Gamtessa and Çule, 2022; Scherz et al., 2023)
β_k	GPP5, GPP7	$\beta_1 = [130, 400\$/t\ CO2eq]$	(Gamtessa and Çule, 2022; Scherz et al., 2023)
δ	GPP5	$\delta = 0.1$	(Chiappinelli and Seres, 2024)
$w_k^0, w_k^{max}, \lambda_1$, t	GPP6	$w_1^0 = 0.1, w_1^{max} = 0.3$, $\lambda_1 = 0.2, t \in [0,4]$	(Braulio-Gonzalo and Bovea, 2020; Lichère, 2025)

3.2.4. Determination of the minimum cost premiums

It is initially assumed that, given its budget constraint, the public authority is willing to pay an additional cost $S'_m(\%)$, representing a theoretical upper bound. This value corresponds to the percentage increase over the lowest submitted price.

$S_m(\%)$ denote the minimum cost that the public authority would be willing to pay under each GPP to reward the environmental performance of an innovative supplier i (see Table 3). The value of $S_m(\%)$ is derived from the indifference point at which the score of the innovative supplier i equals the score of supplier j, who submitted the lowest price.

The estimation of $S_m(\%)$ is based on the condition $C_i = C_j(1 + S_m/100)$. The final decision of the public authority therefore consists of comparing the calculated $S_m(\%)$ for each GPP with its predetermined budget threshold $S'_m(\%)$.

For GPP 1, the additional cost is calculated as the difference between the lowest price submitted by an eligible supplier and the lowest price submitted by a non-eligible supplier. It represents the minimum premium the authority would pay to a supplier that meets the environmental threshold rather than a cheaper supplier excluded due to insufficient environmental performance.

GPP 7 does not allow for the estimation of an additional cost, as the public authority instead implements a post-award monitoring mechanism to verify that actual performance complies with the environmental commitments made during the tendering process. The remaining GPP models are presented below.

Table 3
Minimum cost premiums formulas

GPP	$S_m(\%)$	
GPP 1	$S_m(\%) = 100 * (C_{min} - C_{min}^{ne})/C_{min}^{ne}$	(12)
GPP 2	$S_m(\%) = 100 * \frac{w_1\,(C_{max} - C_j)(E_{j1} - E_{i1})}{w_C\,C_j(E_{1,max} - E_{i1})}$	(13)
GPP 3	$S_m(\%) = 100\left(\frac{\alpha - \frac{w_1\,(C_{max} - C_j)(E_{i1} - E_{j1})}{w_C\,C_j(E_{1,max} - E_{i1})}}{1-\alpha}\right)$	(14)
GPP 4	$S_m(\%) = 100 * \frac{b_0 exp^{-\lambda t}(C_{max} - C_j)}{C_j}$	(15)
GPP 5	$S_m(\%) = 100 * \frac{z_1(T_1 - E_{i1}) + \beta_1(E_{j1} - T_1) + \delta * C_j}{C_j(1-\delta)}$	(16)
GPP 6	$S_m(\%) = 100 * \frac{(w_1^0 + (w_1^{max} - w_1^0)(1 - exp^{-\lambda_1 t}))\,(C_{max} - C_j)(E_{j1} - E_{i1})}{(1 - w_1^{max}) + (w_1^{max} - w_1^0)exp^{-\lambda_1 t}C_j(E_{1,max} - E_{i1})}$	(17)

3.3. Formulation of GHG emission models

This section presents a practical application of the GHG emissions models, examining the comparative environmental performance of two service providers (systems), a conventional system (SC) versus an innovative street-sweeping system (SN) in Victoriaville and Nicolet, Québec. The innovative system includes an innovative broom (Bn), a conventional broom (Bc) and four specialized trucks (Ca) (two dump trucks, one water tanker and one impact-mitigation truck). In comparison, the conventional system comprises two conventional brooms along with the same truck configuration. The average sweeping speed (SS) for the innovative system is 2.9 km/h, with a travel speed (MS) of 27.8 km/h. For the conventional system, these speeds are 2.5 km/h and 19.8 km/h, respectively. Waiting time during unloading is assumed to be negligible due to the synchronized rotation of the two dump trucks. When one truck is full, the other immediately takes over, optimizing workflow. Waiting phases primarily correspond to inter-vehicle coordination, maintenance and personnel breaks. For a

single work shift, waiting represents on average Att_{SN} =23.4 % of total time for the innovative system and Att_{SC} =23.73 % for the conventional system.

The detailed fuel consumption models (Table 4) used to calculate emissions are adapted from Ben Daya et al. (2024), who propose analytical functions differentiated by vehicle state: sweeping (Bal), travel (Dep), or waiting (Att). To estimate the GHG emissions associated with sweeping plans, the Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS) metaheuristic developed by Kraiem et al. (2024) was applied separately to each system to generate operational plans reflecting the real conditions of two Québec Ministry of Transport (MTQ) tenders for Victoriaville and Nicolet street sweeping. The instances were created following Kraiem et al. (2025). The objective function was reformulated to minimize total greenhouse gas emissions and the average values were reported. According to the European Environment Agency (EEA, 2023), the emission factor fe is estimated at 2.68 kg CO_2-eq per liter of diesel. In 2025, the carbon cost cr in Québec is estimated at CAD 0.095 per kg CO_2-eq (Government of Canada, 2025).

Table 4
Fuel consumption models

Vehicles	States	Fuel consumption models (L/h)
Novel broom	Sweeping	$FC_{BnBal} = SS(0.2163SS^2 - 3.2737SS + 15.432)$ (18)
	Moving	$FC_{BnDep} = MS(0.0002MS^2 - 0.00246MS + 1.0622)$ (19)
	Waiting	$FC_{BnAtt} = 4.64$ (20)
Conventional broom	Sweeping	$FC_{BcBal} = SS(0.17304SS^2 - 2.61896SS + 12.344)$ (21)
	Moving	$FC_{BcDep} = MS(0.00016MS^2 - 0.001968MS + 0.8496)$ (22)
	Waiting	$FC_{BcAtt} = 3.71$ (23)
Truck	Sweeping	$FC_{CaBal} = SS(0.0514SS^2 - 0.7676SS + 3.8222)$ (24)
	Moving	$FC_{CaDep} = MS(0.0001MS^2 - 0.0143MS + 0.8579)$ (25)
	Waiting	$FC_{CaAtt} = 2.62$ (26)

3.3.1. Notations

A : set of arcs (i, j) served and traversed

S(i,j) : service time for arc (i, j) in hours

Tr(i,j) : traverse time for arc (i, j) in hours

NbShifts: total number of shifts in a sweeping plan

DtShifts: duration of a single shift in hours

fe : emission factor (kg CO_2-eq per liter of diesel)

cr : carbon cost (CAD $ per kg CO_2-eq)

3.3.2. GHG emission models

- GHG emission model –Innovative system ($)

$$E_{SN1} = fe.cr\left(FC_{BalSN} + FC_{DepSN} + FC_{AttSN}\right) \quad (27)$$

Equation (27) represents the GHG emissions of the innovative system.

$$FC_{BalSN} = \sum_{(i,j)\in A} S(i,j)(FC(i,j)_{BnBal} + FC(i,j)_{BcBal} + 4FC(i,j)_{CaBal}) \quad (28)$$

Equation (28) describes fuel consumption of the innovative system during sweeping.

$$FC_{DepSN} = \sum_{(i,j)\in A} Tr(i,j)\left(FC(i,j)_{BnDep} + FC(i,j)_{BcDep} + 4FC(i,j)_{CaDep}\right) \quad (29)$$

Equation (29) describes fuel consumption of the innovative system during travel without sweeping.

$$FC_{AttSN} = (FC_{BnAtt} + FC_{BcAtt} + 4FC_{CaAtt})NbShifts.DtShifts\ \frac{Att_{SN}}{(100 - Att_{SN})} \quad (30)$$

Equation (30) describes fuel consumption of the innovative system during waiting.

- GHG emission model – Conventional system ($)

$$E_{SC1} = fe.cr\left(FC_{BalSC} + FC_{DepSC} + FC_{AttSC}\right) \quad (31)$$

Equation (31) represents the GHG emissions of the conventional system.

$$FC_{BalSC} = \sum_{(i,j)\in A} S(i,j)(2FC(i,j)_{BcBal} + 4FC(i,j)_{CaBal}) \quad (32)$$

Equation (32) describes fuel consumption of the conventional system during sweeping.

$$FC_{DepSC} = \sum_{(i,j)\in A} Tr(i,j)\left(2FC(i,j)_{BcDep} + 4FC(i,j)_{CaDep}\right) \quad (33)$$

Equation (33) describes fuel consumption of the conventional system during travel without sweeping.

$$FC_{AttSC} = (2FC_{BcAtt} + 4FC_{CaAtt})NbShifts.DtShifts\frac{Att_{SC}}{(100 - Att_{SC})} \quad (34)$$

Equation (30) describes fuel consumption of the conventional system during waiting.

3.4. ALNS optimization framework

The ALNS framework used in this study builds on Kraiem et al. (2024), where the objective was originally to optimize operational street sweeping plans under real service constraints. In the present study, the framework is extended by reformulating the objective function to minimize the GHG for each system (Figure 2).

Sweeping speed, travel speed, waiting times and fuel consumption functions of each system, are integrated into the ALNS to generate feasible routing and scheduling plans and their GHG emissions in monetary terms which serve as inputs to the different GPP models. The ALNS is particularly suited to this application because street sweeping involves a large-scale routing and scheduling problem with multiple operational constraints. The ALNS algorithm starts from an initial feasible solution s_0. At each iteration, a destroy/repair operator is selected based on adaptive probabilities and applied to generate a new solution s'. The new solution is evaluated using the objective function Z and accepted according to a simulated annealing criterion. If the accepted solution improves the best solution s^* found so far, it replaces it. Operator

weights are dynamically updated based on their performance. The process is repeated until a stopping criterion is reached, and the best solution s^* is returned.

Figure 2
ALNS pseudo-code

```
s ← initial feasible routing and scheduling solution
s* ← s
while stopping criterion not met do
   select destroy/repair operator (roulette wheel)
   s' ← generate neighborhood solution from s
   if accept (s', s) then
      s ← s'
      if Z(s) < Z(s*) then
         s* ← s
      end if
   end if
   update operator weights
end while
return best routing plan s*
```

4. NUMERICAL RESULTS

This section presents the minimum cost premium $S_m(\%)$ that the public authority could pay for each GPP model by comparing the two service providers. GHG emissions, expressed in monetary terms, were calculated using the ALNS metaheuristic, first applied to the innovative system and then to the conventional system. For each system, the ALNS was executed 30 times, to account for the stochastic nature of the ALNS metaheuristic. Preliminary tests conducted in prior work showed that 30 runs provide stable routing with limited variability across runs, making this number sufficient for reliable evaluation of the different GPP models (Kraiem et al., 2024). For the conventional solutions in both case studies, the average maximum GHG emissions were determined as $E_{1,max} = 4650.2\$$.

The cost values were deduced directly from the routing solutions generated by the ALNS (Figure 3). For the calculation of the conventional system cost C_{SC}, we relied

on the simulation work of Ben Daya et al. (2024) to estimate average variable costs. The variable sweeping cost is approximately 100 $/h, while the variable travel cost is 20 $/h. Fixed costs are estimated at 2420 $ per day shift and 2635 $ per night shift, based on service provider estimates. This leads to a minimum system cost of $C_{min} = 70k\$$ and a maximum of $C_{max} = 210k\$$.

By executing ALNS 30 times for the innovative system, for both case studies, the average GHG emissions corresponding to the minimum emissions solution were $E_{SN\,1} = E_{1,min} = 1924.93\$$. For all GPP models, the innovative system was compared against the conventional system solution with the lowest price among all the alternatives, which had GHG emissions of $E_{SC\,1} = 3178.41$ $. These results indicate that the innovative system achieves a reduction in GHG emissions of approximately 39.44 % relative to the conventional system, providing a basis for the application of the different GPP models. Given the time horizon and the selected parameters, models GPP2 and GPP6 produce identical results. Consequently, the cost premium estimation presented here focuses on GPP3, GPP4, GPP5, and GPP6.

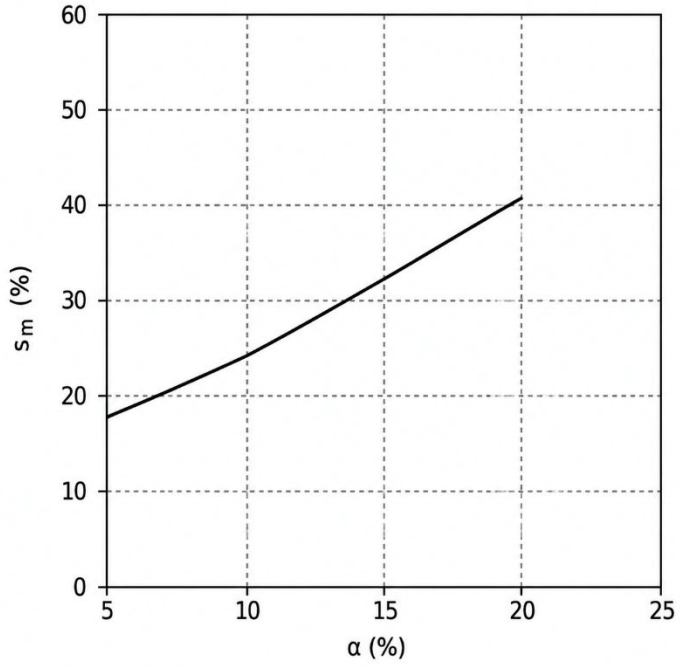
Figure 3
Pseudo-code for total cost function

```
Calculate_Z(s)
   variable_cost ← 0
   For each arc (i,j) in s do
        If ((i,j) is serviced) then
           cost(i,j) ← 100 × S_ij
        Else
           cost(i,j) ← 20 × Tr_ij
        End if
        variable_cost ← variable_cost + cost(i,j)
   End for
   fixed_cost ← (2420 × number of day shifts) + (2635 × number of night shifts)
   Z(s) ← variable_cost + fixed_cost
   Return Z(s)
```

4.1. Cost premium under GPP3

Figure 4 illustrates the variation of $S_m(\%)$ as a function of the preferential margin α that can be chosen by the public authority. To explore model sensitivity, the analysis was extended up to 20 %, with the cost premium estimated for margins ranging from 5 % to 20 %. For low α values (from 5 to 10%), the cost premium ranges from 18.61 % to 25.20 %, indicating that the authority gives moderate preference to environmental performance. For intermediate α values (between 11 and 15 %), the cost premium expands from 26.61 to 32.57 %, reflecting a balanced cost/environment trade-off that recognizes the value of GHG reductions. For high α values (from 16 to 20 %), the cost premium rises from 34.15 % to 40.85 %, demonstrating that the authority prioritizes environmental performance even if the price of the green provider is significantly higher. This model shows that the preferential margin α functions as an operational lever aligned with strategic objectives. By adjusting α, the public authority implicitly sets the level of financial effort it is willing to commit to favor providers that reduce GHG emissions.

Figure 4
Variation of $S_m(\%)$ as a function of the preferential margin α.



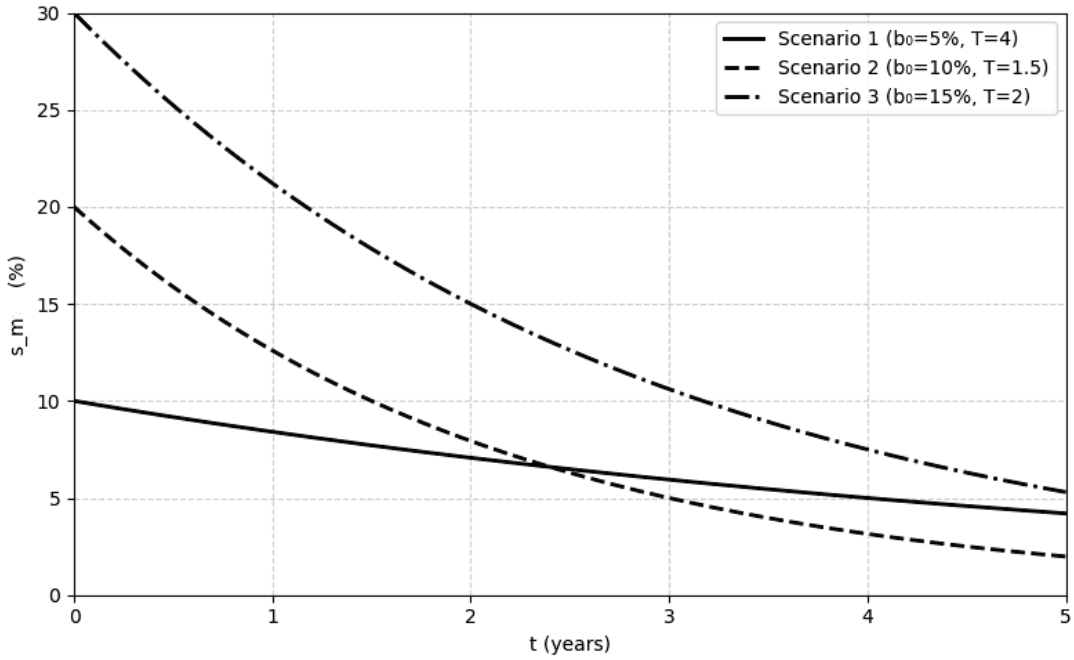
4.2. Cost premium under GPP4

For GPP4, a series of simulations were conducted to evaluate the effect of a dynamic bonus granted to the innovative supplier, i.e., a time-decreasing subsidy designed to encourage the innovative system while limiting the long-term financial burden on the public authority. Three scenarios were simulated to explore different combinations of the initial bonus level b_0 and its decay rate λ. To explore model sensitivity, b_0 was varied up to 15%.

The parameter λ controls the rate at which the bonus decreases over time according to an exponential law b(t)= $b_0 exp^{-\lambda t}$. Assuming that the duration required for the initial bonus to be halved corresponds to the half-life T. Setting b(T)= b_0/2 leads to $exp^{-\lambda t} = 1/2$, hence λ=ln(2)/T. The choice of half-life T depends on the magnitude of the initial bonus b_0. A smaller bonus persists longer (longer half-life), while a larger bonus fades more quickly to avoid excessively prolonged incentives. This parameterization can be adjusted according to the scale of investment in the innovative system.

Scenario 1, the conservative scenario (b_0=5%, T=4 years and λ =0.17), represents a moderate and durable incentive, suitable for a budget-constrained context. Scenario 2, the short-term scenario (b_0=10%, T=1.5 years and $\lambda = 0.46$), reflects a strategy designed to strongly stimulate initial investment. Finally, Scenario 3, the ambitious scenario (b_0=15%, T=2 years and $\lambda = 0.34$), illustrates a more proactive policy, combining a high initial bonus with a slower decay to provide stronger support to the innovative system in the early years. These three scenarios allow a comparison of contrasting public intervention strategies, ranging from minimalist support to a more sustained transitional investment approach.

Figure 5
Variation of $S_m(\%)$ as function of years.

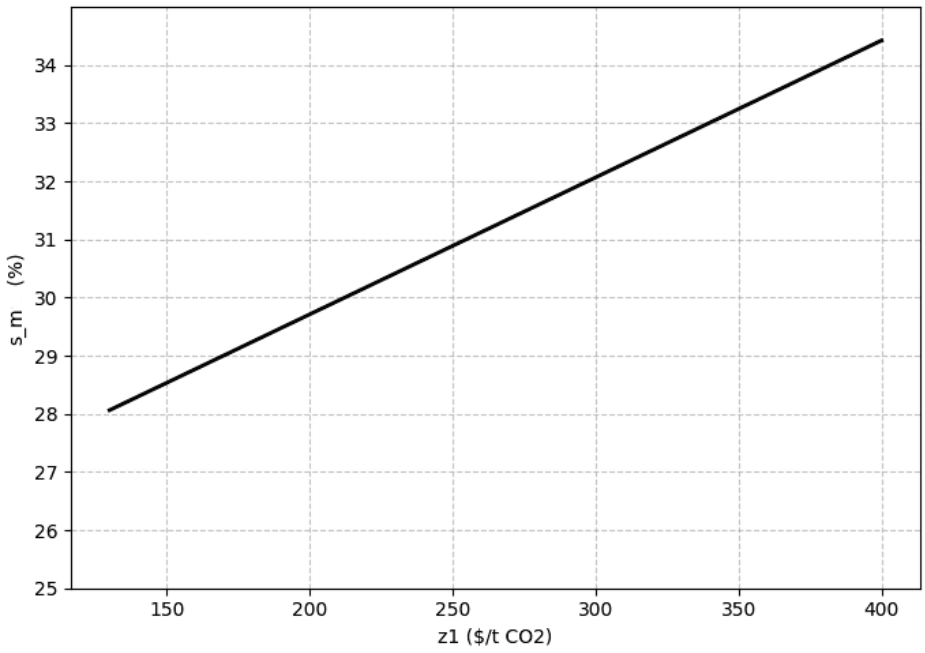


As illustrated in Figure 5, the ambitious scenario yields the highest initial S_m (30 % at t=0) and the largest cumulative cost over five years (89.62%). This scenario strongly encourages adoption but requires a substantial upfront public budget. The conservative scenario maintains a low S_m (10 % at t=0) and a limited five-year cumulative cost (40.63%). While it minimizes market distortions, it may be insufficient to motivate innovative suppliers to invest. The short-term scenario (intermediate b_0 but short half-life) represents a compromise. It provides a noticeable early incentive that quickly diminishes, reducing the total five-year public expenditure (50.67%) compared to the ambitious scenario, yet remains more costly than the conservative approach. In practice, although the bonus decreases according to an exponential law, it is recommended to specify an explicit end time for the bonus to ensure clear budgetary planning.

4.3. Cost premium under GPP5

Based on the GHG emission models, total emissions for the conventional system are 33.45 $t\ CO2eq$ and for the innovative system are equal to 20.26 $t\ CO2eq$. We assume T_1 as the environmental target which is equal to GHG emissions of conventional system. The tested values of the shadow price z_1 range from 130 \$/$t\ CO2eq$ to 400 \$/$t\ CO2eq$, based on the carbon shadow prices reported by Gamtessa & Çule (2022), while the eco-innovation bonus is fixed at a greater value δ = 0.2. Figure 6 shows that the cost premium varies from 28.06% to 34.42% for carbon prices between 130 \$/$t\ CO2eq$ and 400 \$/$t\ CO2eq$. An increase in the carbon price leads to a higher cost premium for the innovative system. This mechanism enables the public authority to value low-emission technologies while remaining transparent about the budgetary threshold. The moderate values of S_m suggest that the public authority can support eco-innovation without exceeding reasonable financial margins, thereby facilitating budget planning and strengthening the economic justification of green public procurement.

Figure 6
Variation of $S_m(\%)$ as function of the shadow price



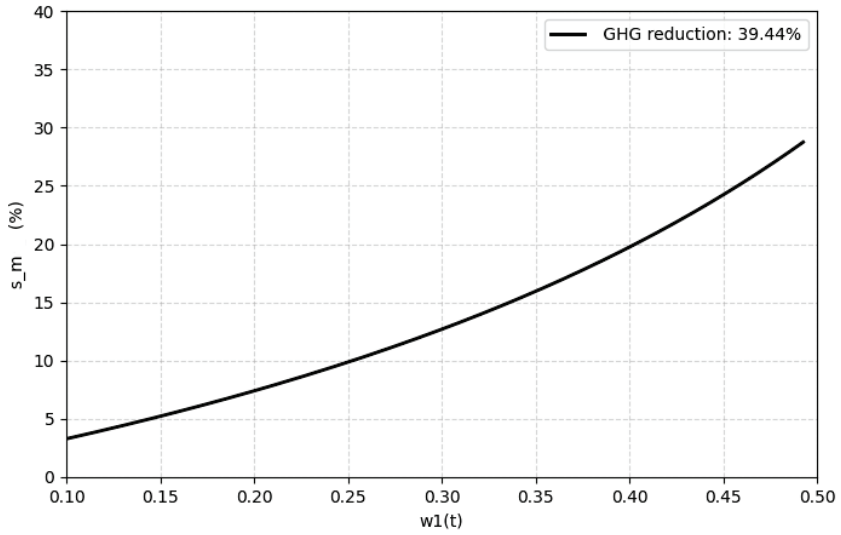
4.4. Cost premium under GPP6

This GPP examines the evolution of the cost premium as a function of dynamically adjusted weighting factors. Table 5 shows that when GHG emissions receive a low weight (t = 0), the additional cost remains limited, around 3.29%, reflecting a decision logic still largely dominated by budgetary considerations. As soon as the environmental weight exceeds 0.173 (t = 1), the cost premium nearly doubles, reaching 6.17%, and then continues to increase in a quasi-linear manner, attaining 13.95% when the environmental weight reaches 0.32.

Table 5
Evolution of the cost premium as a function of GHG weighting over time

t	$w_1(t)$	$S_m(\%)$
0	0.100	3.29
1	0.173	6.17
2	0.232	8.93
3	0.280	11.54
4	0.320	13.95

Figure 7
Variation of $S_m(\%)$ as a function of $w_1(t)$



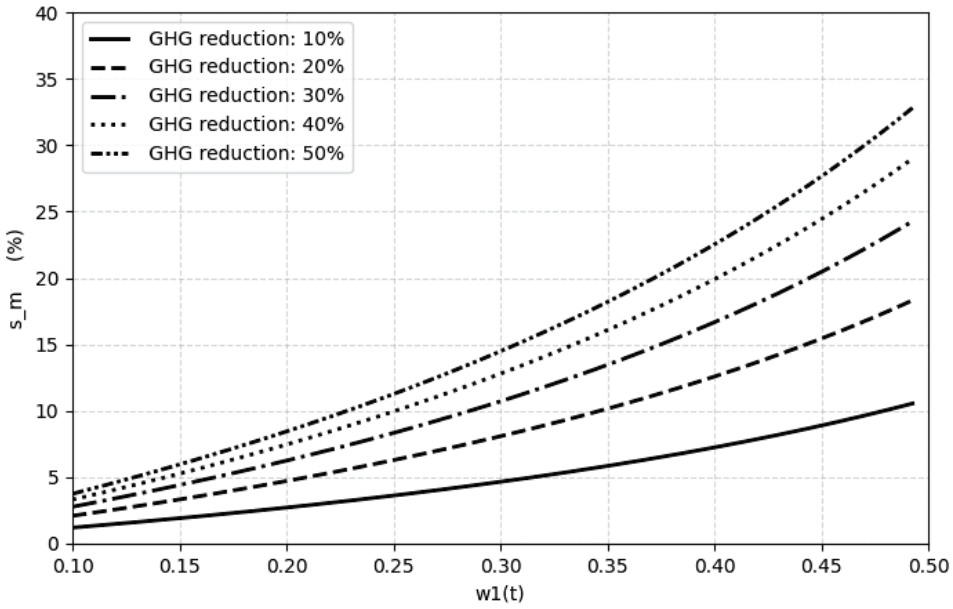
A progressively increasing environmental weight rapidly expands the premium that the public authority can allocate to an eco-innovation capable of reducing emissions by 39.44%. Adjusting these weights therefore becomes a concrete policy lever for making eco-innovation competitive and aligning public procurement with climate objectives. Figure 7 illustrates the evolution of $S_m(\%)$ as a function of $w_1(t)$.

Subsequently, a sensitivity analysis was conducted on the level of GHG emission reductions (ranging from 10% to 50%) and its impact on the cost premium. Table 6 shows that as the environmental weighting progressively increases, the cost premiums rise accordingly. At the beginning of the process (t = 0), when the financial criterion still strongly dominates, the premium remains marginal (from 1.21% to 3.75%), depending on the level of GHG reduction. However, as the environmental weight increases, the premium expands significantly. For example, with a 30% emission reduction, the premium reaches 11.78%, while for a 50% reduction, it rises to 15.91%. Adjusting the weighting factors in public tenders therefore constitutes a direct policy lever for making eco-innovation competitive and for structuring an incentive environment in which genuinely high-performing eco-innovations become economically acceptable. Figure 8 illustrates the evolution of $S_m(\%)$ as a function of $w_1(t)$.

Table 6
Evolution of the cost premium as a function of GHG weighting over time for different levels of GHG reduction

t	$w_1(t)$	$S_m(\%)$				
		10% GHG reduction	20% GHG reduction	30% GHG reduction	40% GHG reduction	50% GHG reduction
0	0.100	1.21	2.10	2.78	3.32	3.75
1	0.173	2.26	3.93	5.21	6.22	7.04
2	0.232	3.28	5.69	7.54	9.01	10.20
3	0.280	4.24	7.35	9.74	11.63	13.17
4	0.320	5.12	8.89	11.78	14.06	15.91

Figure 8
Variation of $S_m(\%)$ as a function of $w_1(t)$ for different levels of GHG reduction.



5. MANAGERIAL IMPLICATIONS

The different GPP models formalized in this study illustrate how a public authority can compare suppliers by simultaneously integrating environmental and monetary criteria. Across the analyzed scenarios, the models highlight how weighting rules and bonus mechanisms influence supplier selection and the cost premium. The cost premium thus emerges as an analytical indicator for interpreting trade-offs between environmental performance and budget constraints.

For example, under GPP3, the preferential margin serves as a calibration tool that adjusts financial effort according to the desired level of environmental ambition. A low margin favors a cost environment compromise, whereas a higher margin prioritizes emission reductions, even if this implies a greater cost premium.

Results under GPP4 show that a time-decreasing bonus can encourage innovative suppliers while maintaining control over public expenditures. In practice,

specifying a clear end date for the bonus is recommended to facilitate budget planning and justification.

GPP5 demonstrates that integrating a carbon shadow price into bid evaluation allows the authority to explicitly value low-emission systems. GPP6 highlights that progressively increasing the weight assigned to environmental criteria expands the premium for eco-innovation, making green solutions more competitive relative to conventional suppliers. This enables policymakers to manage the balance between budgetary efficiency and environmental impact in a flexible and gradual manner.

Across the different GPP, the premium varies considerably. When minimal importance is assigned to the GHG criterion, the additional cost is 3.29%, whereas it can reach up to 40.85% when environmental performance becomes a dominant criterion. However, this premium depends on the sector of application, the authority's budget constraints and the relative importance attributed to green criteria.

The most innovative supplier may fail to win a contract if the defined premium does not adequately reward its innovation efforts. Conversely, it may remain competitive by reducing costs, depending on its return-on-investment strategy. To effectively encourage innovation, the public authority should allocate a budget that meaningfully values environmental criteria.

Each GPP presents distinct advantages and limitations. GPP1 and GPP7 are suitable for filtering or monitoring bids but do not quantify the cost premium. The other GPP allow calibration of financial and environmental incentives. Decision-makers should therefore select the most appropriate model according to their objective, strict compliance control, eco-innovation promotion or cost–environment compromise, and their budgetary constraints.

GPP can also be combined to create hybrid strategies (e.g., GPP3 and GPP5), although such combinations would require recalibration of parameters to ensure

consistency among weights, bonuses and cost premiums. In this study, each GPP was analyzed separately to isolate its effects. Hybridization remains a promising extension for future research.

6. CONCLUSION

This study developed and formalized several GPP models to examine their impact on eco-innovation within public procurement. The contribution addresses a gap in the literature by proposing an analytical framework that translates environmental and climate policy directives into operational models. Methodologically, the study combines this formalization with an optimization-based case-studies analysis, where an ALNS metaheuristic is used to generate feasible operational plans, estimate associated GHG costs, and provide the quantitative inputs required to evaluate the minimum cost premium under each GPP model. By integrating bidding mechanisms, incentive structures, and optimization-derived supplier performance measures, the study analyzes their effects within a service case application.

Across the tested parameters and scenarios, the results show that the cost premium varies significantly depending on the selected GPP and the authority decisions. Under GPP3, the premium increases from 18.61% to 40.85% as the preferential margin rises from 5% to 20%. Under GPP4, the ambitious scenario generates an initial S_m of up to 30%, with a cumulative five-year cost reaching 89.62%. GPP5 produces a premium between 28.06% and 34.42% for carbon prices ranging from 130 $\$/t\ CO2eq$ to 400 $\$/t\ CO2eq$. Under GPP6, the progressive increase in environmental weight raises the premium from marginal levels (from 1 to 3%) to nearly 16%, depending on the magnitude of emission reductions.

However, the analysis is based on an illustrative case study and specific parametric assumptions (values of α, bonus levels, carbon prices and weighting trajectories). The conclusions therefore do not constitute a general rule but rather an

analytical exploration of the potential dynamics of GPP models within a defined framework.

Future research could incorporate additional environmental and social criteria to better reflect the complexity of public procurement decisions. Moreover, studying long-term supplier interactions and market dynamics would allow evaluation of how these procurement models influence overall competitiveness and the sustained adoption of green technologies.

Acknowledgments

This work was supported by Mitacs Accelerate under Grant (IT45080). This support is gratefully acknowledged.

Disclosure of interest

The authors report there are no competing interests to declare.

References

Ahmed, M.Z., O'Donoghue, C., McGetrick, P., 2024. Green public procurement in construction: A systematic review. Cleaner and Responsible Consumption 15, 100234. https://doi.org/10.1016/J.CLRC.2024.100234

Ahsan, K., Rahman, S., 2017. Green public procurement implementation challenges in Australian public healthcare sector. J. Clean. Prod. 152, 181–197. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.03.055

Alvarez, S., Rubicon, A., 2015. Carbon footprint in Green Public Procurement: a case study in the services sector. J. Clean. Prod. 93, 159–166. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.01.048

Ben Daya, B., Audy, J.F., Lamghari, A., 2024. Real-World Data Simulation Comparing GHG Emissions and Operational Performance of Two Sweeping Systems. Logistics 2024, Vol. 8, Page 120 8, 120. https://doi.org/10.3390/LOGISTICS8040120

Braulio-Gonzalo, M., Bovea, M.D., 2020. Criteria analysis of green public procurement in the Spanish furniture sector. J. Clean. Prod. 258, 120704. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.120704

Bryngemark, E., Söderholm, P., Thörn, M., 2023. The adoption of green public procurement practices: Analytical challenges and empirical illustration on Swedish municipalities. Ecological Economics 204, 107655. https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2022.107655

Caruana, J., Vassallo, K., 2024. Green Public Procurement in Public Administration: Perceptions and Challenges in Practice. International Journal of Public Administration. https://doi.org/10.1080/01900692.2024.2381773

Cheng, W., Appolloni, A., D'Amato, A., Zhu, Q., 2018. Green Public Procurement, missing concepts and future trends – A critical review. J. Clean. Prod. 176, 770–784. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.027

Chersan, I.C., Valentin, F.D., Cătălina, G., Vasile, G., 2020. Green Public Procurement in the Academic Literature. Amfiteatru Economic 22, 82–101.

Chiappinelli, O., Seres, G., 2024. Optimal discounts in green public procurement. Econ. Lett. 238, 111705. https://doi.org/10.1016/J.ECONLET.2024.111705

Deambrogio, E., Allegretti, S., Turi, P., Zuccarello, F., Lariccia, P., Aghemo, C., Pellegrino, A., 2017. Increase Sustainability in Buildings Through Public Procurements: The PROLITE project for Lighting Retrofit in Schools. Energy Procedia 111, 328–337. https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.03.194

EEA, 2023. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 | Publications | European Environment Agency (EEA). Copenhagen.

EU, 2022. EU Green Public Procurement (GPP) criteria for the design, construction, renovation, demolition and management of buildings. https://doi.org/10.2760

European Commission, 2019. EU green public procurement criteria for public space maintenance [WWW Document]. URL https://circabc.europa.eu/ui/group/44278090-3fae-4515-bcc2-44fd57c1d0d1/library/3dbf0d36-3a89-4a31-a96f-e0cd06fda842/details (accessed 10.11.25).

Gamtessa, S., Çule, M., 2022. Marginal abatement costs for GHG emissions in Canada: a shadow cost approach. Clean Technologies and Environmental Policy 2022 25:4 25, 1323–1337. https://doi.org/10.1007/S10098-022-02445-4

Government of Canada, 2025. Update to the Pan-Canadian Approach to Carbon Pollution Pricing 2023-2030 - Canada.ca [WWW Document]. URL

https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/climate-change/pricing-pollution-how-it-will-work/carbon-pollution-pricing-federal-benchmark-information/federal-benchmark-2023-2030.html?utm_source=chatgpt.com (accessed 4.10.26).

Guarnieri, P., Gomes, R.C., 2019. Can public procurement be strategic? A future agenda proposition. Journal of Public Procurement 19, 295–321. https://doi.org/10.1108/JOPP-09-2018-0032

Han, Q., Blaauwbroek, S., Lee, P.H., 2024. Environment Performance Criteria as Means for Green Public Procurement. Smart Innovation, Systems and Technologies 378, 11–22. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8501-2_2

IISD, 2024. Monitoring Progress in Green Public Procurement, Methods, challenges, and case studies.

Kraiem, A., Audy, J.F., Lamghari, A., 2025. Mixed integer linear programming model for a multi-depot arc routing problem with different arc types and flexible assignment of end depot. Transportation Research Procedia 82, 1109–1119. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.12.115

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. https://doi.org/10.1080/01605682.2024.2432605

Krieger, B., Rainville, A., 2026. The effects of public procurement requirements and voluntary standards on environmental product innovation. Res. Policy 55, 105419. https://doi.org/10.1016/J.RESPOL.2026.105419

Krieger, B., Zipperer, V., 2022. Does green public procurement trigger environmental innovations? Res. Policy 51, 104516. https://doi.org/10.1016/J.RESPOL.2022.104516

Lagström, C., Ek Österberg, E., 2025. Exploring Sustainable Public Procurement Through Regulatory Conversations. Financial Accountability & Management 41, 247–261. https://doi.org/10.1111/FAAM.12412

Leal, A.R., Perez-Castillo, D., Amorós, J.E., Husted, B.W., 2020. Municipal Green Purchasing in Mexico: Policy Adoption and Implementation Success. Sustainability 2020, Vol. 12, Page 8339 12, 8339. https://doi.org/10.3390/SU12208339

Lichère, F., 2025. Green public procurement : lessons from the fields : Canada, France, Italy, Portugal, Netherlands and Switzerland. Presses de l'Université Laval.

Lindfors, A., Ammenberg, J., 2021. Using national environmental objectives in green public procurement: Method development and application on transport procurement in Sweden. J. Clean. Prod. 280, 124821. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.124821

Liu, J., Ma, Y., Appolloni, A., Cheng, W., 2021. How external stakeholders drive the green public procurement practice? An organizational learning perspective. Journal of Public Procurement 21, 138–166. https://doi.org/10.1108/JOPP-04-2020-0035

Menon, R.R., Ravi, V., 2022. Using AHP-TOPSIS methodologies in the selection of sustainable suppliers in an electronics supply chain. Cleaner Materials 5, 100130. https://doi.org/10.1016/J.CLEMA.2022.100130

Morley, A., 2021. Procuring for change: An exploration of the innovation potential of sustainable food procurement. J. Clean. Prod. 279, 123410. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.123410

OECD, 2025. Innovation policy transformed?, OECD Science, Technology and Industry Working Papers, OECD Science, Technology and Industry Working Papers. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/5EE60CB5-EN

OECD, 2024. Harnessing Public Procurement for the Green Transition: Good Practices in OECD Countries. https://doi.org/https://doi.org/10.1787/e551f448-en

Orfanidou, V.S., Rachaniotis, N.P., Tsoulfas, G.T., Chondrokoukis, G.P., 2023. Life Cycle Costing Implementation in Green Public Procurement: A Case Study from the Greek Public Sector. Sustainability 2023, Vol. 15, Page 2817 15, 2817. https://doi.org/10.3390/SU15032817

Ortega Carrasco, P., Iannone, F., Ferrón Vílchez, V., Testa, F., 2025. Green public procurement as an effective way for sustainable development: A systematic literature review and bibliometric analysis. Sustainable Development 33, 2364–2391. https://doi.org/10.1002/SD.3234

Oz, B., 2024. A non-price-based tender evaluation methodology considering tenderers' self-confidence with partial value functions and time decay analysis. Expert Syst. Appl. 252, 124186. https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2024.124186

Rainville, A., 2022. Green Public Procurement in Mission-Orientated Innovation Systems: Leveraging Voluntary Standards to Improve Sustainability Performance of Municipalities. Sustainability 2022, Vol. 14, Page 8591 14, 8591. https://doi.org/10.3390/SU14148591

Rainville, A., 2017. Standards in green public procurement – A framework to enhance innovation. J. Clean. Prod. 167, 1029–1037. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.10.088

Sapir, A., Schraepen, T., Tagliapietra, S., 2022. Green Public Procurement: A Neglected Tool in the European Green Deal Toolbox? Intereconomics 57, 175–178. https://doi.org/10.1007/S10272-022-1044-7/METRICS

Scherz, M., Kreiner, H., Alaux, N., Passer, A., 2023. Transition of the procurement process to Paris-compatible buildings: consideration of environmental life cycle costing in tendering and awarding. International Journal of Life Cycle Assessment 28, 843–861. https://doi.org/10.1007/S11367-023-02153-1/TABLES/2

Singh, Shubhendu, Singh, G., Singh, Sarthak, Misra, S.C., 2024. Understanding green procurement dynamics: An assessment framework for public sector organizations. J. Environ. Manage. 351, 119756. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2023.119756

Sönnichsen, S.D., Clement, J., 2020. Review of green and sustainable public procurement: Towards circular public procurement. J. Clean. Prod. 245, 118901. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.118901

Su, S., Zhu, C., Li, X., 2019. A dynamic weighting system considering temporal variations using the DTT approach in LCA of buildings. J. Clean. Prod. 220, 398–407. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.02.140

Testa, F., Annunziata, E., Iraldo, F., Frey, M., 2016. Drawbacks and opportunities of green public procurement: an effective tool for sustainable production. J. Clean. Prod. 112, 1893–1900. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2014.09.092

Treviño-Lozano, L., Nelson, V., Pillay, R.G., Dehbi, F., Gruskin, S., 2021. Sustainable Public Procurement and Human Rights: Barriers to Deliver on Socially Sustainable Road Infrastructure Projects in Mexico. Sustainability 2021, Vol. 13, Page 9605 13, 9605. https://doi.org/10.3390/SU13179605

Tsai, W.T., 2017. Green public procurement and green-mark products strategies for mitigating greenhouse gas emissions—experience from Taiwan. Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang. 22, 729–742. https://doi.org/10.1007/S11027-015-9695-3/TABLES/5

Wang, B., Shen, Z., 2025. The impact of green public procurement on corporate ESG performance. J. Environ. Manage. 391, 126394. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2025.126394

Xu, S., Chu, C., Ju, M., Shao, C., 2016. System Establishment and Method Application for Quantitatively Evaluating the Green Degree of the Products in Green Public Procurement. Sustainability 8, 941. https://doi.org/10.3390/SU8090941

Yang, Y., Morotomi, T., 2025. When can green public procurement really stimulate eco-innovation? Considering the role of intellectual capital. J. Clean. Prod. 492, 144841. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2025.144841

Zhang, R., Zhu, G., 2025. Source prevention or end-of-pipe treatment? Green public procurement and corporate environmental investment strategies. J. Environ. Manage. 379, 124880. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2025.124880

Zhang, Z., Jiang, Y., 2022. Can green public procurement change energy efficiency? Evidence from a quasi-natural experiment in China. Energy Econ. 113, 106244. https://doi.org/10.1016/J.ENECO.2022.106244

Zheng, S., Wen, J., 2024. Green public procurement and corporate environmental performance: An empirical analysis based on data from green procurement contracts. International Review of Economics & Finance 96, 103578. https://doi.org/10.1016/J.IREF.2024.103578

CINQUIÈME CHAPITRE
DISCUSSION GÉNÉRALE DES RÉSULTATS, LIMITES ET PISTES DE RECHERCHES FUTURES

Le dernier chapitre de cette thèse présente une discussion générale des résultats issus de nos différentes analyses (section 1), suivie des contributions méthodologiques (section 2) et managériales (section 3). Il se conclut par une présentation des limites de la recherche ainsi que des pistes pour des travaux futurs (section 4).

5.1. DISCUSSION DES RÉSULTATS DE LA RECHERCHE

L'objectif de cette section est de mettre en évidence les contributions de notre travail à l'enrichissement des connaissances en comparant nos résultats à ceux des recherches antérieures. Cette démarche permettra d'identifier les contributions méthodologiques ainsi que les contributions managériales destinées aux praticiens.

5.1.1. Planification des opérations de balayage

La première question de recherche visait à déterminer comment améliorer l'efficience opérationnelle des opérations de balayage printanier à l'aide d'un outil de planification avancée. Les résultats obtenus montrent que les modèles développés permettent de générer des plans de balayage plus efficients, notamment en réduisant la durée totale des opérations et le nombre de quarts de travail nécessaires. Ces résultats démontrent qu'une approche d'optimisation peut constituer un outil d'aide à la décision pertinent pour soutenir les prestataires de services lors de la préparation des soumissions. Ces résultats s'inscrivent dans la continuité des travaux portant sur l'optimisation des opérations de balayage. Malgré l'importance de ces opérations pour la propreté urbaine et la gestion environnementale, les études consacrées à leur planification demeurent relativement limitées (Vanegas-Useche et al., 2015; Yu et al., 2019).

Par exemple, Cerrone et al. (2014) ont proposé un algorithme génétique visant à minimiser la distance totale parcourue par les balayeuses tout en respectant certaines contraintes liées aux règlements de stationnement et aux horaires de balayage. Yurtseven et Gökçe (2019) ont développé un modèle mathématique pour optimiser le routage des balayeuses électriques en intégrant la capacité des camions et la recharge des batteries afin de minimiser la consommation énergétique. Plus récemment, Parsons et al. (2024, 2025) ont proposé des approches heuristiques et génétiques permettant notamment de réduire les détours et d'équilibrer la charge de travail entre les véhicules.

Toutefois, ces contributions se concentrent principalement sur des objectifs tels que la minimisation des distances parcourues ou de la consommation énergétique et prennent rarement en compte certaines contraintes opérationnelles observées dans le contexte réel du service de balayage. En particulier, plusieurs études ne considèrent pas la contrainte de retour à un dépôt qui n'est pas forcément le même que celui de départ ou encore la nécessité d'effectuer certaines opérations à des moments spécifiques, comme le balayage des autoroutes durant les quarts de nuit afin de limiter les perturbations liées au trafic. En intégrant ces contraintes opérationnelles dans la modélisation du problème de planification, la présente recherche se rapproche davantage des conditions réelles d'exploitation et propose ainsi une approche plus représentative des besoins du prestataire de services.

Enfin, les résultats de cette recherche mettent en évidence l'intérêt d'intégrer des outils d'optimisation dans le processus de planification des opérations de balayage, notamment au stade de la préparation des soumissions aux appels d'offres. En améliorant les estimations relatives à la durée des opérations et aux ressources nécessaires, les heuristiques de construction des plans initiaux de balayage et la métaheuristique basée sur la recherche à grand voisinage adaptative proposées permettent au prestataire de services de préparer des soumissions plus réalistes et plus compétitives et libérer les équipements pour réaliser d'autres contrats. Ainsi, en générant des plans de balayage plus efficients, cette recherche contribue à améliorer

non seulement la performance opérationnelle de l'entreprise de balayage, mais également sa capacité à rester compétitives dans le cadre des processus d'appel d'offres.

Toutefois, ces résultats doivent être interprétés à la lumière des hypothèses retenues dans la modélisation. Les expérimentations numériques ont été réalisées dans un contexte déterministe et ne tiennent pas explicitement compte de certains aléas opérationnels, tels que les conditions météorologiques, les interruptions de circulation ou les pauses des équipes. Bien que les modèles intègrent plusieurs contraintes représentatives du contexte étudié, leur performance pourrait différer dans d'autres environnements opérationnels ou selon les pratiques propres à d'autres prestataires de services.

5.1.2. Décisions d'investissement en innovation technologique et efficience opérationnelle

La deuxième question de recherche visait à comprendre comment les gains d'efficience opérationnelle associés à une augmentation de la vitesse de balayage peuvent orienter les décisions d'investissement en R&D pour la conception de brosses adaptées au système novateur. Les résultats obtenus dans cette thèse apportent une contribution importante en mettant en évidence les liens entre innovation technologique, planification des opérations et performance économique dans le secteur du balayage printanier.

Dans ce secteur caractérisé par une concurrence élevée, les prestataires de services doivent maintenir un niveau élevé de qualité de service tout en proposant des prix compétitifs dans le cadre des appels d'offres. Dans ce contexte, la maîtrise des coûts opérationnels devient un enjeu stratégique majeur. Au sein du système de balayage, la brosse constitue l'élément goulot qui conditionne la vitesse de balayage et, par conséquent, l'efficience globale des opérations. Toutefois, l'augmentation de la vitesse de balayage soulève plusieurs contraintes techniques et opérationnelles,

notamment en ce qui concerne la qualité du nettoyage et la dégradation prématurée des brosses. Bien que ces aspects ne soient pas modélisés explicitement dans cette recherche, ils seront pris ultérieurement en considération dans l'interprétation des résultats à la lumière des travaux existants. Ces contraintes illustrent que l'amélioration de la performance opérationnelle ne peut se limiter à une simple augmentation de la vitesse de balayage, mais nécessite un effort de R&D visant à concevoir des brosses capables de fonctionner efficacement sous des contraintes mécaniques plus élevées.

Les résultats obtenus dans cette recherche montrent que l'augmentation de la vitesse de balayage peut générer des gains opérationnels significatifs, notamment en réduisant la durée totale des opérations, le nombre de quarts nécessaires et le coût global d'exécution. Ces gains ont été évalués à l'aide de l'outil de planification développé dans cette thèse en intégrant les caractéristiques du système novateur. En utilisant cet outil, il a été possible de simuler différents scénarios de vitesse de balayage et d'en mesurer les impacts sur les indicateurs de performance opérationnelle. Cette approche fournit ainsi des repères quantifiés permettant d'évaluer le potentiel d'amélioration de l'efficience opérationnelle associé à une augmentation de la vitesse de balayage. Par exemple, les gains les plus significatifs se situent entre 3,9 km/h et 8,9 km/h, avec une diminution de 43,39 % pour la durée des opérations et les coûts. Au-delà de 8,9 km/h, les réductions marginales diminuent. Entre 9,9 km/h et 14,9 km/h, la durée diminue de 7,7 % et les coûts de 6,8 %, tandis qu'au-delà de 14,9 km/h, les gains sont très limités (4,9 % pour la durée et 5,2 % pour les coûts). Cela suggère que l'augmentation de la vitesse au-delà de ces niveaux n'est pas nécessairement justifiée financièrement.

Ces résultats contribuent à combler une lacune importante dans la littérature. Les travaux existants portent principalement sur les performances techniques des brosses, leur efficacité de nettoyage, leur durée de vie ou encore les effets de la vitesse sur la réduction des polluants (Bartolozzi et al., 2018; Jeong et al., 2025; Milijaš et al., 2023; Vanegas-Useche et al., 2015). En revanche, peu d'études analysent les

conséquences opérationnelles et économiques de l'augmentation de la vitesse de balayage.

La présente recherche contribue à combler ce manque en proposant une démarche d'évaluation prospective permettant de quantifier les retombées opérationnelles et économiques associées à l'augmentation de la vitesse de balayage. En combinant l'application de la métaheuristique avec une analyse de scénarios de vitesse, il devient possible d'évaluer de manière systématique l'impact des innovations technologiques sur les performances globales du système de balayage. Les résultats obtenus démontrent que les améliorations technologiques visant à augmenter la vitesse de balayage peuvent générer des gains substantiels en termes de réduction de la durée des opérations, du nombre de quarts nécessaires et du coût total d'exécution.

Enfin, les résultats obtenus offrent des repères concrets pour orienter les décisions d'investissement en R&D. En projetant les gains opérationnels potentiels associés à différentes vitesses de balayage sur une saison d'opérations, il devient possible d'estimer les économies susceptibles d'être générées par l'adoption de brosses plus performantes. Ces estimations constituent une information utile pour alimenter une future analyse de retour sur investissement et pour définir les spécifications techniques que devront atteindre les futures brosses afin de maintenir la qualité du nettoyage à des vitesses plus élevées. Toutefois, cette recherche ne modélise pas les coûts d'investissement associés au développement de ces innovations. Par conséquent, une évaluation complète du retour sur investissement dépasse le cadre de cette étude et nécessiterait l'intégration des coûts de conception des nouvelles brosses.

5.1.3. Marchés publics verts et éco-innovation

La troisième question de recherche visait à développer un cadre analytique de marchés publics verts permettant d'évaluer le surcoût associé à l'attribution d'un contrat à un fournisseur éco-innovant. Les résultats obtenus montrent qu'il est possible

d’intégrer explicitement des critères environnementaux dans l’évaluation des soumissions à l’aide de modèles analytiques permettant d’explorer différents mécanismes d’adjudication.

La littérature reconnaît largement le potentiel des MPV pour stimuler l’éco-innovation et renforcer la compétitivité des entreprises (Yang et Morotomi, 2025). Plusieurs études ont montré que l’obtention de contrats publics verts peut inciter les entreprises à développer des technologies et des procédés plus durables (Caravella et Crespi, 2021; Czarnitzki et al., 2020; Stojčić, 2021). Dans la même logique, l’OECD (2016) considère les MPV comme un instrument stratégique capable d’orienter les marchés vers des solutions technologiques plus respectueuses de l’environnement.

Toutefois, la majorité des travaux s'intéressent principalement aux cadres réglementaires, aux obstacles de mise en œuvre ou aux politiques publiques, sans proposer de modèles analytiques permettant d'intégrer explicitement les critères environnementaux dans le processus d'évaluation des soumissions (Yang et Morotomi, 2025). Les recommandations formulées dans la littérature demeurent souvent générales et offrent peu d'outils permettant aux autorités publiques d'analyser les conséquences des différents mécanismes d'évaluation sur les décisions d'adjudication.

La présente thèse contribue à combler cette lacune en proposant un cadre analytique permettant d’intégrer explicitement la performance environnementale dans l’évaluation des soumissions de services de balayage. Ce cadre repose sur le développement de modèles de MPV combinant un critère économique et un critère environnemental basé sur les émissions de GES. Les performances environnementales utilisées dans ces modèles proviennent de l’outil de planification avancée développé, qui permet d’estimer les émissions associées des deux systèmes de balayage. Ces estimations sont ensuite intégrées dans les modèles de MPV afin de comparer de manière quantitative et transparente les soumissions concurrentes.

Ce cadre analytique permet de tester différents modèles de MPV et analyser leurs conséquences budgétaires et environnementales. En modifiant les paramètres des modèles, il devient possible d'explorer différentes dynamiques décisionnelles et d'évaluer leur impact sur le processus d'adjudication des appels d'offres. Cette approche permet notamment d'estimer le surcoût que l'autorité publique pourrait payer à un fournisseur éco-innovant.

En outre, ce cadre analytique enrichit la littérature sur les interactions entre marchés publics et éco-innovation. Les études existantes montrent que les MPV peuvent stimuler l'innovation lorsque les incitations sont suffisamment fortes et lorsque les critères environnementaux sont clairement définis (Yang et Morotomi, 2025; Zheng et Wen, 2024). Toutefois, les preuves empiriques demeurent encore limitées, notamment dans les secteurs de services (Radicic et Jackson, 2025). En proposant un modèle analytique appliqué au secteur du balayage, cette recherche apporte un éclairage empirique sur la manière dont les mécanismes d'évaluation des appels d'offres peuvent influencer la compétitivité des solutions éco-innovantes.

Enfin, cette recherche met en évidence l'importance de disposer d'outils analytiques permettant d'intégrer les dimensions économiques et environnementales dans les décisions d'achat public. En reliant les résultats de la planification opérationnelle aux modèles des MPV, le cadre proposé permet de mieux comprendre comment les innovations vertes peuvent être valorisées dans les processus d'adjudication. Cette recherche examine ainsi comment les MPV peuvent être modélisés et paramétrés afin d'explorer différentes dynamiques décisionnelles. Une telle analyse permet d'éclairer les implications financières liées au choix d'un modèle plutôt qu'un autre, tout en soulignant que les résultats obtenus demeurent contextuels.

Toutefois, les résultats obtenus doivent être interprétés dans le contexte des hypothèses retenues pour les expérimentations numériques. Les modèles proposés ont été appliqués au secteur du balayage printanier en considérant uniquement les

émissions de GES comme critère environnemental. Leur transposition à d'autres secteurs ou à des appels d'offres intégrant plusieurs critères environnementaux nécessiterait des adaptations des paramètres et des mécanismes d'évaluation.

5.2. CONTRIBUTIONS MÉTHODOLOGIQUES

5.2.1. La méthode de résolution de RAGV et les opérateurs

Sur le plan méthodologique, cette recherche apporte une contribution en développant une méthode de résolution reposant sur des heuristiques et une métaheuristique de RAGV pour générer des plans de balayage dans un temps raisonnable. Les problèmes de planification des opérations de balayage appartiennent à la classe des problèmes NP-difficiles, ce qui signifie que le nombre de solutions possibles augmente de manière exponentielle avec la taille du réseau à traiter. Dans ce contexte, les méthodes exactes peuvent rapidement devenir difficiles à appliquer à des instances de grande taille. L'algorithme RAGV se distingue par sa capacité à explorer efficacement l'espace des solutions en alternant des phases de destruction et de reconstruction des itinéraires, permettant ainsi de trouver des solutions de haute qualité dans des temps de calcul raisonnables. Cette approche a été largement utilisée dans la résolution de différentes variantes des problèmes de tournées de véhicules (Lahyani et al., 2019; Ropke et Pisinger, 2006).

Une contribution importante de cette recherche réside également dans le développement d'opérateurs spécifiques intégrés à l'algorithme de RAGV afin de tenir compte des particularités opérationnelles du problème étudié. En plus des opérateurs classiques utilisés dans la littérature (O1 et O2), de nouveaux opérateurs (O3, O4 et O5) ont été conçus pour gérer certaines contraintes spécifiques, notamment la présence de différents types d'arcs à balayer et l'affectation flexible des dépôts. Les résultats numériques montrent que ces opérateurs spécifiques améliorent significativement la qualité des solutions obtenues par rapport à l'utilisation exclusive des opérateurs

classiques. Cette contribution méthodologique souligne l'importance d'adapter les mécanismes de recherche aux caractéristiques propres du problème étudié afin de mieux représenter les contraintes réelles des opérations de balayage.

5.2.2. Innovation technologique

Cette recherche apporte une contribution méthodologique en proposant une approche intégrée permettant d'évaluer les retombées opérationnelles et économiques associées à l'innovation dans les équipements de balayage, en particulier les brosses. Alors que la littérature existante s'est principalement concentrée sur les performances techniques des brosses, telles que leur durée de vie (Bartolozzi et al., 2018), leur efficacité mécanique (Milijaš et al., 2023; Vanegas-Useche et al., 2015), la qualité du balayage (Fayzullayevich et al., 2022; Jeong et al., 2025) ou encore leur rendement énergétique (Donati et al., 2020; Pan et al., 2023; Wang et al., 2025), elle demeure limitée quant à l'analyse de leurs impacts sur la performance globale des opérations.

En s'appuyant sur cette lacune, la présente thèse propose une démarche analytique qui relie explicitement les caractéristiques techniques d'une innovation (l'augmentation de la vitesse de balayage) à ses conséquences opérationnelles (durée des opérations et planification des tournées) et économiques. Cette approche repose sur l'utilisation d'outils de planification avancée permettant de générer des plans de balayage efficients, à partir desquels des indicateurs quantitatifs sont extraits afin d'évaluer l'impact de différents niveaux de performance technologique.

Ainsi, la contribution ne réside pas uniquement dans l'étude d'un cas spécifique, mais dans la structuration d'un cadre méthodologique permettant de quantifier, de manière cohérente, les effets d'une innovation technologique sur l'ensemble du système opérationnel. Ce cadre offre notamment la possibilité de projeter les gains potentiels en termes de durée et de coûts, facilitant ainsi l'évaluation du retour sur investissement et l'aide à la décision en matière de R&D.

Par ailleurs, bien que cette recherche se concentre sur l'innovation dans les brosses de balayage, l'approche proposée peut être mobilisée pour analyser d'autres types d'innovations technologiques dans le secteur du balayage, ou plus largement dans des contextes opérationnels similaires. En reliant de manière systématique les performances techniques aux résultats opérationnels et économiques, cette démarche contribue à une meilleure intégration des considérations d'innovation dans les processus décisionnels des prestataires de services.

5.2.3. Formalisation des marchés publics verts

La contribution méthodologique concerne l'intégration des résultats issus de la planification dans un cadre analytique permettant d'explorer différentes configurations de marchés publics verts. Les performances environnementales estimées à partir de la planification, notamment en termes d'émissions de GES, sont utilisées pour analyser la manière dont ces indicateurs pourraient être pris en compte dans les mécanismes d'évaluation des soumissions dans un contexte d'appels d'offres publics.

Cette approche permet d'examiner différents modèles intégrant à la fois des critères économiques et environnementaux, afin d'explorer les dynamiques décisionnelles associées à ces choix de modèles. L'objectif n'est pas de proposer une méthode normative d'attribution des contrats, mais plutôt d'analyser comment différentes structures d'évaluation peuvent influencer les résultats de l'adjudication et les arbitrages entre considérations économiques et environnementales.

En reliant les résultats de la planification aux différents modèles de MPV, cette recherche permet d'étudier les interactions entre performance environnementale et économique. Les résultats obtenus demeurent toutefois dépendants du contexte étudié et des paramètres retenus, ce qui limite leur généralisation. Néanmoins, cette approche offre un cadre analytique permettant d'explorer les dynamiques potentielles associées à l'intégration de critères environnementaux dans les marchés publics.

5.3. CONTRIBUTIONS MANAGÉRIALES

Cette thèse apporte également plusieurs contributions managériales pour le prestataire de service. Les résultats obtenus permettent notamment d'éclairer les décisions relatives à la planification des opérations de balayage, de guider les décisions d'investissement en R&D en brosses adaptées au système novateur ainsi que l'intégration de considérations environnementales dans les marchés publics pour estimer le surcoût minimum pour l'octroi d'un contrat à un fournisseur éco-innovant par rapport aux fournisseurs-compétiteurs.

Une première contribution concerne le développement de l'outil de planification opérationnelle permettant au prestataire de service d'améliorer la planification de ses opérations de balayage routier. L'outil lui permet également d'estimer les performances de ses systèmes de balayage en tenant compte des contraintes opérationnelles.

Les résultats liés à la deuxième question de recherche apportent une contribution managériale importante pour Arseno Balayage en éclairant les décisions d'investissement en R&D pour le développement de brosses plus performantes. Les analyses montrent que l'augmentation de la vitesse de balayage peut générer des gains d'efficience significatifs en réduisant la durée des opérations, le nombre de quarts nécessaires et les coûts d'exécution.

Grâce à l'outil de planification développé, il a été possible de tester différents scénarios de vitesse de balayage et d'en évaluer les impacts sur la performance opérationnelle du système novateur. Cette approche permet ainsi d'estimer les bénéfices potentiels associés au développement de brosses capables de fonctionner efficacement à des vitesses plus élevées.

Les résultats fournissent aussi des repères utiles pour soutenir les décisions d'investissement en R&D en permettant d'estimer les économies opérationnelles susceptibles d'être générées sur une saison complète d'opérations.

Une troisième contribution concerne la capacité de quantifier les émissions de GES associées aux opérations de balayage. Pour le prestataire de service, l'outil de planification et les modèles de GES développés lui offrent la possibilité de mieux évaluer les performances environnementales associées à ses systèmes de balayage. Dans une éventuelle transition vers les MPV, la capacité de quantifier ces performances peut constituer un élément important pour appuyer les discussions avec les décideurs publics et les gestionnaires municipaux. Les résultats de l'estimation des surcoûts à payer par l'autorité publique permettent d'éclairer les conditions dans lesquelles le système novateur peut être reconnu dans les processus d'attribution des contrats publics.

En outre, cette recherche apporte également des éléments d'éclairage pour les autorités publiques lors de la préparation et de l'évaluation des contrats de balayage. L'outil de planification pourrait être utilisé à l'interne par les autorités publiques afin d'estimer les ressources, les délais et les coûts nécessaires à l'exécution des contrats de balayage. Ces analyses permettraient de vérifier les exigences des appels d'offres, de mieux dimensionner les contrats et de comparer différents scénarios de planification avant leur publication.

L'analyse des MPV réalisée dans cette thèse met en évidence la manière dont différentes configurations de modèles peuvent influencer les décisions d'adjudication et la compétitivité des solutions proposées par les entreprises. Les résultats permettent ainsi d'illustrer les arbitrages potentiels entre considérations budgétaires et objectifs environnementaux lorsque des critères environnementaux sont intégrés dans les processus d'évaluation des soumissions. Ces résultats peuvent aider les autorités publiques à mieux comprendre les implications financières associées à l'intégration de

critères environnementaux dans les appels d'offres, ainsi que les effets potentiels de ces choix sur la sélection des prestataires de services. Ils soulignent également l'importance de concevoir des mécanismes d'évaluation transparents et cohérents afin de favoriser la prise en compte des objectifs environnementaux dans les décisions d'attribution des contrats. À cet égard, les récentes évolutions du cadre réglementaire du Gouvernement du Québec (2026) en matière d'acquisition responsable témoignent d'une volonté accrue d'intégrer les considérations environnementales dans les marchés publics et renforcent la pertinence des approches étudiées dans cette recherche. Toutefois, la mise en œuvre de tels mécanismes dans les processus d'adjudication demeure en évolution, ce qui souligne l'importance de poursuivre les efforts visant à opérationnaliser ces considérations dans les pratiques d'approvisionnement public.

Dans l'ensemble, les contributions managériales de cette thèse offrent des éléments d'analyse permettant d'éclairer les décisions du prestataire de service et des autorités publiques dans les services de balayage et dans les processus de marchés publics. Bien que les résultats obtenus soient liés au contexte spécifique étudié, ils fournissent des indications utiles pour comprendre les interactions entre performance économique, performance environnementale et mécanismes d'attribution des contrats publics.

5.4. LES LIMITES DE LA RECHERCHE ET PISTES DE RECHERCHES FUTURES

Dans cette section, on présente les limites liées à cette recherche qui offrent également des pistes intéressantes pour des recherches futures visant à approfondir la compréhension des opérations de balayage et des dynamiques associées aux marchés publics verts.

Une première limite concerne les données utilisées pour alimenter l'outil de planification développé. Dans un contexte opérationnel réel, plusieurs facteurs peuvent

influencer la performance des opérations de balayage, tels que les variations dans les conditions de circulation, la quantité de balayures, les conditions météorologiques ou d'autres imprévus opérationnels. Ces éléments peuvent entraîner des écarts entre les performances estimées par l'outil et celles observées lors de l'exécution réelle des opérations. Des recherches futures pourraient ainsi développer une version stochastique du modèle de planification afin de mieux représenter les incertitudes opérationnelles. Contrairement au modèle actuel, qui repose sur des paramètres déterministes basés sur des valeurs moyennes, les travaux futurs pourraient intégrer des paramètres incertains, tels que les temps de service ou les quantités de balayures. À partir de données historiques, des techniques d'intelligence artificielle pourraient être utilisées pour apprendre les distributions de probabilité de ces paramètres, générer des scénarios plausibles, puis les intégrer dans un modèle de tournées de véhicules stochastique.

Deuxièmement, une autre perspective consiste à combiner l'optimisation et la simulation. Une telle approche permettrait d'évaluer la robustesse des solutions obtenues sous différents scénarios d'exploitation et d'analyser l'impact des incertitudes sur la performance opérationnelle des plans de balayage.

Par ailleurs, bien que le processus de planification manuelle actuellement utilisé par le partenaire industriel soit reconnu comme étant complexe et chronophage, son niveau de performance n'a pas fait l'objet d'une évaluation quantitative exhaustive dans le cadre de cette recherche. Une analyse exploratoire des données de géolocalisation des véhicules a mis en évidence la présence de périodes d'arrêt et de trajets plus longs que ceux obtenus avec les solutions optimisées. Des recherches futures pourraient également consister à réaliser une étude comparative plus approfondie entre les plans manuels et les solutions optimisées, en intégrant progressivement ces contraintes afin de mieux quantifier les gains potentiels associés à l'optimisation de la planification.

Une deuxième limite concerne l'analyse de l'innovation technologique liée à l'augmentation de la vitesse de balayage. Dans cette recherche, l'amélioration de la vitesse a été étudiée principalement sous l'angle de ses impacts opérationnels et économiques. Toutefois, d'autres dimensions techniques pourraient être analysées plus en profondeur dans des travaux futurs. Par exemple, les effets de l'augmentation de la vitesse sur la durabilité des brosses ou encore la qualité du nettoyage pourraient faire l'objet d'analyses complémentaires. De même, des collaborations interdisciplinaires combinant les approches de recherche opérationnelle, d'ingénierie mécanique et de science des matériaux pourraient permettre de mieux comprendre les compromis techniques associés au développement de brosses plus performantes. La qualité du nettoyage n'est pas modélisée de manière explicite et elle n'est prise en compte qu'indirectement à travers des hypothèses appuyées par la littérature. Aussi, les scénarios correspondant aux vitesses les plus élevées doivent être considérés comme en partie exploratoires et pourraient ne pas être entièrement réalisables dans des conditions d'exploitation réelles. Par ailleurs, cette recherche n'avait pas pour objectif de développer ni de valider expérimentalement de nouvelles brosses de balayage. Elle visait plutôt à fournir un outil d'aide à la décision permettant de quantifier les gains opérationnels et économiques potentiels associés à une augmentation de la vitesse de balayage afin d'orienter les décisions d'investissement en R&D. Le développement de nouvelles brosses constituera une étape ultérieure qui relèvera principalement des domaines de l'ingénierie mécanique et de la science des matériaux. Les scénarios de vitesse élevés ont donc été considérés comme exploratoires. Une perspective de recherche consisterait à évaluer expérimentalement l'usure des brosses, le maintien d'un niveau de qualité de nettoyage acceptable à la fois d'un point de vue normatif que selon la perception des usagers du réseau routier afin d'identifier une vitesse optimale répondant à l'ensemble de ces critères.

Des recherches futures pourraient également intégrer les coûts d'investissement liés au développement de nouvelles brosses afin de réaliser une évaluation complète du retour sur investissement de l'innovation. Elles pourraient également approfondir les

effets de l'augmentation de la vitesse sur la durabilité des brosses, la qualité du nettoyage et les autres compromis techniques associés à leur conception.

Une troisième limite concerne la portée des résultats associés à l'analyse des MPV. Le cadre analytique développé dans cette thèse vise principalement à explorer les dynamiques décisionnelles qui peuvent émerger lorsque des critères environnementaux sont intégrés dans les processus d'évaluation des soumissions. Toutefois, les résultats obtenus demeurent fortement dépendants du contexte étudié, notamment en ce qui concerne les paramètres utilisés dans les tests et les hypothèses relatives aux processus d'adjudication des appels d'offres. Par conséquent, les conclusions tirées de cette analyse ne peuvent être généralisées directement à l'ensemble des secteurs ou des juridictions. Des recherches futures pourraient étendre cette approche à d'autres contextes institutionnels ou à d'autres types de services municipaux afin d'examiner comment les MPV influencent l'adoption d'innovations environnementales dans différents secteurs.

Cette recherche s'est principalement concentrée sur les émissions de GES comme indicateur de performance environnementale. Bien que cet indicateur soit particulièrement pertinent dans le contexte des politiques climatiques actuelles, d'autres dimensions environnementales pourraient être intégrées dans les analyses futures. Par exemple, les impacts liés aux particules fines, à la consommation d'eau ou aux effets sur la qualité de l'air pourraient être pris en compte afin d'obtenir une évaluation plus complète des performances environnementales des systèmes de balayage. À cet égard, les modèles de marchés publics verts proposés dans cette recherche ont été formulés de manière suffisamment générale pour permettre la prise en compte simultanée de plusieurs critères environnementaux à travers l'ensemble K. Dans le cadre de cette thèse, seuls les GES ($k = 1$) ont été considérés dans les expérimentations numériques par souci de concision. Des travaux futurs pourraient ainsi étendre l'analyse en intégrant plusieurs critères environnementaux et en ajustant

les poids ou les paramètres associés à chacun d'eux selon les priorités des autorités publiques.

Enfin, cette recherche a permis de concevoir et d'évaluer plusieurs artefacts dans un contexte opérationnel réel. Toutefois, des travaux futurs pourraient approfondir davantage la démarche de Design Science en renforçant les interactions itératives avec le partenaire industriel. De nouvelles itérations de conception, d'évaluation et d'amélioration des artefacts permettraient notamment de recueillir une rétroaction plus approfondie des utilisateurs, d'ajuster les solutions proposées en fonction des besoins opérationnels et d'accompagner leur déploiement progressif en milieu réel.

Dans l’ensemble, ces limites soulignent la complexité des interactions entre innovation technologique, planification des opérations et mécanismes de marchés publics. Les pistes de recherche identifiées ouvrent la voie à de futurs travaux visant à approfondir l’analyse de ces interactions et à mieux comprendre les conditions favorisant le développement et l’adoption de solutions de balayage plus efficaces et plus durables.

CONCLUSION

Cette thèse avait pour objectif de développer des outils d'aide à la décision permettant d'améliorer la planification des opérations de balayage, d'évaluer les retombées d'innovations technologiques et de soutenir l'intégration de critères environnementaux dans les marchés publics.

Pour répondre à ces enjeux, trois objectifs complémentaires ont été poursuivis. Le premier objectif visait à développer un modèle mathématique et une méthode de résolution afin d'obtenir une planification plus efficace des opérations de balayage et des plans plus efficients, tout en respectant les contraintes opérationnelles et contractuelles. Le deuxième objectif consistait à analyser les gains opérationnels et économiques potentiels d'une innovation dans les brosses de balayage, en quantifiant l'impact de l'augmentation de la vitesse de balayage sur la performance opérationnelle. Le troisième objectif portait sur la modélisation des marchés publics verts, à travers le développement de cadres analytiques permettant d'intégrer des critères environnementaux dans l'évaluation des soumissions et d'estimer de manière transparente le surcoût pour l'octroi du contrat à un prestataire éco-innovant.

Dans l'ensemble, les contributions de cette recherche montrent que la combinaison d'une planification opérationnelle avancée, d'une évaluation quantitative des innovations technologiques et d'une modélisation analytique des MPV constitue un levier essentiel pour améliorer l'efficience, la durabilité et la cohérence des décisions dans le secteur du balayage printanier. Cette approche intégrée contribue à renforcer à la fois la capacité décisionnelle des prestataires de services et le rôle des autorités publiques dans la valorisation de l'éco-innovation.

Enfin, les expérimentations réalisées à partir des deux instances réelles ont mis en évidence l'importance de la qualité et de la disponibilité des données de géolocalisation pour la planification efficace des opérations de balayage.

La construction de ces instances a notamment nécessité un travail important de traitement et de reconstruction des données, en raison de l'absence d'informations géographiques détaillées, telles que les coordonnées précises des points de début et de fin des tronçons à balayer. À cet égard, il serait pertinent que les futurs appels d'offres prévoient la mise à disposition de données de géolocalisation complètes, incluant notamment les coordonnées précises des segments à entretenir. Une telle démarche faciliterait le recours à des outils d'aide à la décision plus performants et contribuerait à une gestion plus efficiente et durable des opérations de balayage.

Déclaration relative à l'utilisation de l'intelligence artificielle

Dans le cadre de la rédaction de cette thèse, l'auteure a utilisé des outils d'intelligence artificielle générative (ChatGPT) que pour améliorer la grammaire et la structure des phrases.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abdallah, A. B., Alfar, N. A. et Alhyari, S. (2021). The effect of supply chain quality management on supply chain performance: the indirect roles of supply chain agility and innovation. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, *51*(7), 785-812. https://doi.org/10.1108/IJPDLM-01-2020-0011

Abdel-Wahab, M. M., Wang, C., Vanegas-Useche, L. V. et Parker, G. A. (2011). Experimental determination of optimum gutter brush parameters and road sweeping criteria for different types of waste. *Waste Management*, *31*(6), 1109-1120. https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2010.12.014

Abubakar, M. A. et Amina, N. (2021). A Genetic clustering algorithm for Multi Depot vehicle Routing Problem. *Sule Lamido University Journal of Science and Technology (SLUJST)*, *2*(1), 19-29.

Achmad, A., Aswanto, Musakkir et Asis, A. (2025). The impact of supplier selection and monitoring, as well as green procurement, on the efficiency of goods/services procurement. *Lex localis - Journal of Local Self-Government*, *23*(10), 1735-1747. https://doi.org/10.52152/801595

Afshar-Nadjafi, B. et Afshar-Nadjafi, A. (2017). A constructive heuristic for time-dependent multi-depot vehicle routing problem with time-windows and heterogeneous fleet. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, *29*(1), 29-34. https://doi.org/10.1016/j.jksues.2014.04.007

Ahmad Ibrahim, S. R., Yahaya, J. et Sallehudin, H. (2022). Green Software Process Factors: A Qualitative Study. *Sustainability 2022, Vol. 14, Page 11180*, *14*(18), 11180. https://doi.org/10.3390/SU141811180

Ahmed, M. Z., O'Donoghue, C. et McGetrick, P. (2024). Green public procurement in construction: A systematic review. *Cleaner and Responsible Consumption*, *15*, 100234. https://doi.org/10.1016/J.CLRC.2024.100234

Ahsan, K. et Rahman, S. (2017). Green public procurement implementation challenges in Australian public healthcare sector. *Journal of Cleaner Production*, *152*, 181-197. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.03.055

Akpan, I. J., Soopramanien, D. et Kwak, D. H. (2021). Cutting-edge technologies for small business and innovation in the era of COVID-19 global health pandemic. *Journal of Small Business and Entrepreneurship*, *33*(6), 607-617. https://doi.org/10.1080/08276331.2020.1799294

Aldenius, M. et Khan, J. (2017). Strategic use of green public procurement in the bus sector: Challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, *164*, 250-257. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.06.196

Aldenius, M., Tsaxiri, P. et Lidestam, H. (2022). The role of environmental requirements in Swedish public procurement of bus transports. *International Journal of Sustainable Transportation*, *16*(5), 391-405. https://doi.org/10.1080/15568318.2021.1879975

Alhola, K., Ryding, S. O., Salmenperä, H. et Busch, N. J. (2019). Exploiting the Potential of Public Procurement: Opportunities for Circular Economy. *Journal of Industrial Ecology*, *23*(1), 96-109. https://doi.org/10.1111/JIEC.12770

Ali, S. S., Ersöz, F., Kaur, R., Altaf, B. et Weber, G. W. (2021). A quantitative analysis of low carbon performance in industrial sectors of developing world. *Journal of Cleaner Production*, *28*(4), 125-268. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.125268

Alinaghian, M. et Shokouhi, N. (2018). Multi-depot multi-compartment vehicle routing problem, solved by a hybrid adaptive large neighborhood search. *Omega*, *76*, 85-99. https://doi.org/10.1016/J.OMEGA.2017.05.002

Alvarez, S. et Rubicon, A. (2015). Carbon footprint in Green Public Procurement: a case study in the services sector. *Journal of Cleaner Production*, *93*, 159-166. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.01.048

Apostolov, M. et Coco, N. (2020). Digitalization-Based Innovation — A Case Study Framework. *International Journal of Innovation and Technology Management*, *18*(5). https://doi.org/10.1142/S021987702050025X

Archetti, C., Guastaroba, G. et Speranza, M. G. (2014). An ILP-refined tabu search for the Directed Profitable Rural Postman Problem. *Discrete Applied Mathematics*, *163*(PART 1), 3-16. https://doi.org/10.1016/j.dam.2012.06.002

Arlbjørn, J. S., de Haas, H. et Munksgaard, K. B. (2011). Exploring supply chain innovation. *Logistics Research 2010 3:1*, *3*(1), 3-18. https://doi.org/10.1007/S12159-010-0044-3

Aslam, M., Shafi, I., Ahmed, J., de Marin, M. S. G., Flores, E. S., Gutiérrez, M. A. R. et Ashraf, I. (2023). Impact of Innovation-Oriented Human Resource on Small and Medium Enterprises' Performance. *Sustainability 2023, Vol. 15, Page 6273*, *15*(7), 6273. https://doi.org/10.3390/SU15076273

Azadeh, A. et Farrokhi-Asl, H. (2019). The close–open mixed multi depot vehicle routing problem considering internal and external fleet of vehicles. *Transportation Letters*, *11*(2), 78-92. https://doi.org/10.1080/19427867.2016.1274468

Azevedo, A. et Almeida, A. H. (2021). Grasp the Challenge of Digital Transition in SMEs—A Training Course Geared towards Decision-Makers. *Education Sciences 2021, Vol. 11, Page 151*, *11*(4), 151. https://doi.org/10.3390/EDUCSCI11040151

Barrena, E., Canca, D., Coelho, L. C. et Laporte, G. (2014). Single-line rail rapid transit timetabling under dynamic passenger demand. *Transportation Research Part B: Methodological*, *70*, 134-150. https://doi.org/10.1016/J.TRB.2014.08.013

Bartelsman, E. J., Falk, M., Hagsten, E. et Polder, M. (2018). Productivity, technological innovations and broadband connectivity: firm-level evidence for ten European countries. *Eurasian Business Review 2018 9:1*, *9*(1), 25-48. https://doi.org/10.1007/S40821-018-0113-0

Bartolozzi, I., Baldereschi, E., Daddi, T. et Iraldo, F. (2018). The application of life cycle assessment (LCA) in municipal solid waste management: A comparative study on street sweeping services. *Journal of Cleaner Production*, *182*, 455-465. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.01.230

Baxter, P. et Jack, S. (2008). Qualitative Case Study Methodology: Study Design and Implementation for Novice Researchers. *The Qualitative Report*, *13*, 544-559.

Bayındır, S. et Demir, H. İ. (2025). Green Outsourcing Service Procurement with Hybrid Fuzzy AHP-TOPSIS Method in the Public Sector. *Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications*, *8*(2), 156-172. https://doi.org/10.38016/JISTA.1447380

Becker, C., Cavagnini, R., Irnich, S. et Schneider, M. (2026). Rule-based design of a granular tabu search for the multi-depot vehicle routing problem. *Annals of Operations Research 2026*, 1-49. https://doi.org/10.1007/s10479-025-06960-7

Ben Daya, B., Audy, J. F. et Lamghari, A. (2024). Real-World Data Simulation Comparing GHG Emissions and Operational Performance of Two Sweeping Systems. *Logistics 2024, Vol. 8, Page 120*, *8*(4), 120. https://doi.org/10.3390/LOGISTICS8040120

Bernal, R., San-Jose, L. et Retolaza, J. L. (2019). Improvement actions for a more social and sustainable public procurement: A Delphi analysis. *Sustainability (Switzerland)*, *11*(15). https://doi.org/10.3390/SU11154069

Birkel, H. S., Veile, J. W., Müller, J. M., Hartmann, E. et Voigt, K. I. (2019). Development of a Risk Framework for Industry 4.0 in the Context of Sustainability for Established Manufacturers. *Sustainability 2019, Vol. 11, Page 384*, *11*(2), 384. https://doi.org/10.3390/SU11020384

Blouin, F., Audy, J.-F. et Lamghari, A. (2020). Simulation d'une chaîne de valeur circulaire dans le balayage de rue printanier : étude préliminaire. *13ème Conférence internationale de modélisation, optimisation et simulation (MOSIM2020) 12-14 Nov 2020, Agadir, Maroc. hal-03192687f*. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03192687

Bolaños, R. I., Willmer Escobar, J. et Echeverri, M. G. (2018). A metaheuristic algorithm for the multi-depot vehicle routing problem with heterogeneous fleet. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, *9*, 461-478. https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2017.11.005

Bonafide Research. (2025). *Street Sweepers Market Outlook, 2030*. https://www.researchandmarkets.com/report/road-sweepers

Bourdon, I. et Jaouen, A. (2016). Strategic Innovation in Microfirms to Overcome Resistance to Change. *Global Business and Organizational Excellence*, *35*(6), 65-74. https://doi.org/10.1002/JOE.21713

Brammer, S. et Walker, H. (2011). Sustainable procurement in the public sector: An international comparative study. *International Journal of Operations and Production Management*, *31*(4), 452-476. https://doi.org/10.1108/01443571111119551

Braulio-Gonzalo, M. et Bovea, M. D. (2020). Criteria analysis of green public procurement in the Spanish furniture sector. *Journal of Cleaner Production*, *258*, 120704. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.120704

Bryngemark, E., Söderholm, P. et Thörn, M. (2023). The adoption of green public procurement practices: Analytical challenges and empirical illustration on Swedish municipalities. *Ecological Economics*, *204*, 107655. https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2022.107655

Calabrese, G. G., Falavigna, G. et Ippoliti, R. (2024). Innovation policy and corporate finance: The Italian automotive supply chain and its transition to Industry 4.0. *Journal of Policy Modeling*, *46*(2), 336-353. https://doi.org/10.1016/J.JPOLMOD.2024.01.007

Caravella, S. et Crespi, F. (2021). The role of public procurement as innovation lever: evidence from Italian manufacturing firms. *Economics of Innovation and New Technology*, *30*(7), 663-684. https://doi.org/10.1080/10438599.2020.1761591

Caruana, J. et Vassallo, K. (2024). Green Public Procurement in Public Administration: Perceptions and Challenges in Practice. *International Journal of Public Administration*. https://doi.org/10.1080/01900692.2024.2381773

Černý, V. (1985). Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm. *Journal of Optimization Theory and Applications*, *45*(1), 41-51. https://doi.org/10.1007/BF00940812/METRICS

Cerrone, C., Dussault, B., Golden, B. et Wasil, E. (2014). Multi-period street scheduling and sweeping. *International Journal of Metaheuristics*, *3*(1), 21.

Cerutti, A. K., Contu, S., Ardente, F., Donno, D. et Beccaro, G. L. (2016). Carbon footprint in green public procurement: Policy evaluation from a case study in the food sector. *Food Policy*, *58*, 82-93. https://doi.org/10.1016/J.FOODPOL.2015.12.001

Chatzoglou, P. et Chatzoudes, D. (2018). The role of innovation in building competitive advantages: an empirical investigation. *European Journal of Innovation Management*, *21*(1), 44-69. https://doi.org/10.1108/EJIM-02-2017-0015

Chen, J., Li, Q., Zhang, P. et Wang, X. (2024). Does Technological Innovation Efficiency Improve the Growth of New Energy Enterprises? Evidence from Listed Companies in China. *Sustainability 2024, Vol. 16, Page 1573*, *16*(4), 1573. https://doi.org/10.3390/SU16041573

Cheng, W., Appolloni, A., D'Amato, A. et Zhu, Q. (2018). Green Public Procurement, missing concepts and future trends – A critical review. *Journal of Cleaner Production*, *176*, 770-784. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.027

Chesbrough, Henry. (2003). The Logic of Open Innovation. *California Management Review*, *45*(3), 33-58. https://doi.org/10.1177/000812560304500301

Chesbrough, Henry et Bogers, M. (2014). Explicating Open Innovation: Clarifying an Emerging Paradigm for Understanding Innovation. Dans H. Chesbrough, W. Vanhaverbeke et J. West (dir.), *New Frontiers in Open Innovation* (p. 3-28). Oxford university.

Chiappinelli, O. et Seres, G. (2024). Optimal discounts in green public procurement. *Economics Letters*, *238*, 111705. https://doi.org/10.1016/J.ECONLET.2024.111705

Chiu, H. N., Lee, Y. S. et Chang, J. H. (2006). Two approaches to solving the multi-depot vehicle routing problem with time windows in a time-based logistics environment. *Production Planning & Control*, *17*(5), 480-493. https://doi.org/10.1080/09537280600765292

Choi, M., Cha, H. et Cheong, T. (2026). Multi-Period Multi-Depot Vehicle Routing Problem for Mobile Center-Based Last Mile Delivery. *IEEE Access*, *14*, 28957-28973. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2026.3666531

Chupina, Z., Chursin, A., Boginsky, A. et Kvasov, I. (2023). Sustainable Economic Development of Enterprises: A Methodology Based on the Toolkit. *Sustainability 2023, Vol. 15, Page 12682*, *15*(17), 12682. https://doi.org/10.3390/SU151712682

Cinar, E., Trott, P. et Simms, C. (2019). A systematic review of barriers to public sector innovation process. *Public Management Review*, *21*(2), 264-290. https://doi.org/10.1080/14719037.2018.1473477

Cinar, E., Trott, P. et Simms, C. (2021). An international exploration of barriers and tactics in the public sector innovation process. *Public Management Review*, *23*(3), 326-353. https://doi.org/10.1080/14719037.2019.1668470

Clauss, T. (2017). Measuring business model innovation: conceptualization, scale development, and proof of performance. *R&D Management*, *47*(3), 385-403. https://doi.org/10.1111/RADM.12186

Coelho, L. C., Cordeau, J. F. et Laporte, G. (2012). Consistency in multi-vehicle inventory-routing. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *24*, 270-287. https://doi.org/10.1016/J.TRC.2012.03.007

Cole, R., Purao, S., Rossi, M. et Sein, M. (2005). Being Proactive: Where Action Research Meets Design Research. *ICIS 2005 Proceedings*. https://aisel.aisnet.org/icis2005/27

Commission européenne. (2008). *Public procurement for a better environment*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52008DC0400

Commission Européenne. (2021). *Revision of the EU Green Public Procurement Criteria for Road transport*.

Commission européenne. (2021). *Study on the effectiveness of public innovation support for SMEs in Europe*. https://doi.org/10.2826/7745

Cordeau, J.-F., Gendreau, M. et Laporte, G. (1997). A tabu search heuristic for periodic and multi-depot vehicle routing problems. *Networks*, *30*(2), 105-119. https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0037(199709)30:2<105::AID-NET5>3.0.CO;2-G

Cordeau, J.-F., Laporte, G. et Mercier, A. (2001). A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows. *Journal of the Operational Research Society*, *52*(8), 928-936. https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601163

Cordeau, J.-F., Laporte, G. et Mercier, A. (2004). Improved tabu search algorithm for the handling of route duration constraints in vehicle routing problems with time windows. *The Journal of the Operational Research Society*, *55*(5), 542-546.

Coreynen, W., Matthyssens, P. et Van Bockhaven, W. (2017). Boosting servitization through digitization: Pathways and dynamic resource configurations for manufacturers. *Industrial Marketing Management*, *60*, 42-53. https://doi.org/10.1016/J.INDMARMAN.2016.04.012

Cornett, M. M., Erhemjamts, O. et Tehranian, H. (2019). Competitive environment and innovation intensity. *Global Finance Journal*, *41*, 44-59. https://doi.org/10.1016/J.GFJ.2019.02.002

Corona-Treviño, L. (2023). Public service innovation to fight corruption: metrics and policy in Mexico 2019–2022. *Journal of Innovation and Entrepreneurship 2023 12:1*, *12*(1), 83-. https://doi.org/10.1186/S13731-023-00347-3

Correia, F., Howard, M., Hawkins, B., Pye, A. et Lamming, R. (2013). Low carbon procurement: An emerging agenda. *Journal of Purchasing and Supply Management*, *19*(1), 58-64. https://doi.org/10.1016/J.PURSUP.2012.11.004

Costa, A., Crupi, A., De Marco, C. E. et Di Minin, A. (2023). SMEs and open innovation: Challenges and costs of engagement. *Technological Forecasting and Social Change*, *194*, 122731. https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2023.122731

Crevier, B., Cordeau, J. F. et Laporte, G. (2007). The multi-depot vehicle routing problem with inter-depot routes. *European Journal of Operational Research*, *176*(2), 756-773. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.08.015

Crossan, F. (2003). Research philosophy: Towards an understanding. *Nurse Researcher*, *11*(1), 46-55. https://www.proquest.com/openview/50680005369760aa60ce4ea801e272d8/1?cbl=33100&pq-origsite=gscholar

Czarnitzki, D., Hünermund, P. et Moshgbar, N. (2020). Public Procurement of Innovation: Evidence from a German Legislative Reform. *International Journal of Industrial Organization*, *71*, 102620. https://doi.org/10.1016/J.IJINDORG.2020.102620

Damanpour, F. (2014). Footnotes to research on management innovation. *Organization Studies*, *35*(9), 1265-1285. https://doi.org/10.1177/0170840614539312

Dantzig, G. B. et Ramser, J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, *6*(1), 80-91.

Das, S. et Wiseman, C. L. S. (2024). Examining the effectiveness of municipal street sweeping in removing road-deposited particles and metal(loid)s of respiratory health concern. *Environment International*, *187*, 108-697. https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2024.108697

Daya, B. Ben, Audy, J. F. et Lamghari, A. (2022). Characterization of the Spatiotemporal Behavior of a Sweeping System Using Supervised Machine Learning Enhanced with Feature Engineering. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, *662 IFIP*, 245-261.

De Marco, C. E., Martelli, I. et Di Minin, A. (2020). European SMEs' engagement in open innovation When the important thing is to win and not just to participate, what should innovation policy do? *Technological Forecasting and Social Change*, *152*, 119843. https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2019.119843

De Mattos, C. S., Pellegrini, G., Hagelaar, G. et Dolfsma, W. (2023). Systematic literature review on technological transformation in SMEs: a transformation encompassing technology assimilation and business model innovation. *Management Review Quarterly*, *74*(2), 1. https://doi.org/10.1007/S11301-023-00327-7

Deambrogio, E., Allegretti, S., Turi, P., Zuccarello, F., Lariccia, P., Aghemo, C. et Pellegrino, A. (2017). Increase Sustainability in Buildings Through Public Procurements: The PROLITE project for Lighting Retrofit in Schools. *Energy Procedia*, *111*, 328-337. https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.03.194

Deng, Q. et Ji, S. (2018). A Review of Design Science Research in Information Systems: Concept, Process, Outcome, and Evaluation. *Pacific Asia Journal of the Association for Information Systems*, *10*(1), 1-36. https://doi.org/10.17705/1PAIS.10101

Diófási-Kovács, O. et Tátrai, T. (2025). Environmentally Sustainable Public Procurement of Construction Projects – Implementing Circularity Approach. *Public Works Management and Policy*, *30*(1), 137-162. https://doi.org/10.1177/1087724X241290269

Divakar, K. (2019). Builders Perceptions on the Factors to be Monitored at Tendering and Mobilization Stage Affecting the Performance of South Indian Construction Projects. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, *100*(1), 33-39. https://doi.org/10.1007/S40030-018-0343-2/TABLES/8

Donati, L., Fontanini, T., Tagliaferri, F. et Prati, A. (2020). An Energy Saving Road Sweeper Using Deep Vision for Garbage Detection. *Applied Sciences 2020, Vol. 10, Page 8146*, *10*(22), 8146. https://doi.org/10.3390/APP10228146

Durach, C. F., Kembro, J. et Wieland, A. (2017). A New Paradigm for Systematic Literature Reviews in Supply Chain Management. *Journal of Supply Chain Management*, *53*(4), 67-85. https://doi.org/10.1111/jscm.12145

Durrani, N., Raziq, A., Mahmood, T. et Khan, M. R. (2024). Barriers to adaptation of environmental sustainability in SMEs: A qualitative study. *PLOS ONE*, *19*(5), e0298580. https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0298580

EEA. (2023). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 | Publications | European Environment Agency (EEA)*. https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/emep-eea-guidebook-2023

Elshaer, R. et Awad, H. (2020). A taxonomic review of metaheuristic algorithms for solving the vehicle routing problem and its variants. *Computers & Industrial Engineering*, *140*, 106242. https://doi.org/10.1016/J.CIE.2019.106242

Environnement Canada. (2007, 5 janvier). *Effectiveness of street sweeping in stormwater pollution source control : interim report : summary of the 2004 & 2005 field seasons, Markham Road, Toronto*. National Water Research Institute. https://publications.gc.ca/site/eng/9.875919/publication.html

EU. (2022). EU Green Public Procurement (GPP) criteria for the design, construction, renovation, demolition and management of buildings. DRAFT TECHNICAL REPORT (v1.0). https://doi.org/10.2760

Fanelli, R. M. (2021). Barriers to Adopting New Technologies within Rural Small and Medium Enterprises (SMEs). *Social Sciences 2021, Vol. 10, Page 430*, *10*(11), 430. https://doi.org/10.3390/SOCSCI10110430

Fayzullayevich, J. V., Tan, G., Alex, F. J., Wu, Y. et Agyeman, P. K. (2022). Numerical Study of Factors Affecting Particle Suction Efficiency of Pick-Up Head of a Regenerative Air Vacuum Sweeper. *Processes 2022, Vol. 10, Page 1252*, *10*(7), 1252. https://doi.org/10.3390/PR10071252

Ferri, L., Iuorio, M., Maffei, M. et Meucci, F. (2025). Environmental Awareness and Sustainable Public Procurement: An Analysis of Perceptions of Public Officials. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, *0*, 1-14. https://doi.org/10.1002/CSR.70244

Foss, N. J. et Saebi, T. (2017). Fifteen Years of Research on Business Model Innovation: How Far Have We Come, and Where Should We Go? *Journal of Management*, *43*(1), 200-227. https://doi.org/10.1177/0149206316675927

Fusillo, F., Orsatti, G. et Scandura, A. (2025). Public green demand and green innovation: evidence from US firms. *Eurasian Business Review*, *15*(3), 647-679. https://doi.org/10.1007/S40821-025-00304-Y/TABLES/7

Galindo, M. Á. et Méndez, M. T. (2014). Entrepreneurship, economic growth, and innovation: Are feedback effects at work? *Journal of Business Research*, *67*(5), 825-829. https://doi.org/10.1016/J.JBUSRES.2013.11.052

Gamtessa, S. et Çule, M. (2022). Marginal abatement costs for GHG emissions in Canada: a shadow cost approach. *Clean Technologies and Environmental Policy 2022 25:4*, *25*(4), 1323-1337. https://doi.org/10.1007/S10098-022-02445-4

Gao, D., Xu, Z., Ruan, Y. Z. et Lu, H. (2017). From a systematic literature review to integrated definition for sustainable supply chain innovation (SSCI). *Journal of Cleaner Production*, *142*, 1518-1538. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.11.153

García-Granero, E. M., Piedra-Muñoz, L. et Galdeano-Gómez, E. (2018). Eco-innovation measurement: A review of firm performance indicators. *Journal of Cleaner Production*, *191*, 304-317. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.04.215

Gault, F. (2018). Defining and measuring innovation in all sectors of the economy. *Research Policy*, *47*(3), 617-622. https://doi.org/10.1016/J.RESPOL.2018.01.007

Geldes, C., Felzensztein, C. et Palacios-Fenech, J. (2017). Technological and non-technological innovations, performance and propensity to innovate across industries: The case of an emerging economy. *Industrial Marketing Management*, *61*, 55-66. https://doi.org/10.1016/J.INDMARMAN.2016.10.010

Gendreau, M. et Potvin, J. Y. (2010). *Handbook of Metaheuristics* (vol. 146; édité par M. Gendreau et J.-Y. Potvin). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1665-5

Ghisetti, C. (2017). Demand-pull and environmental innovations: Estimating the effects of innovative public procurement. *Technological Forecasting and Social Change*, *125*, 178-187. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.07.020

Ghisetti, C. et Pontoni, F. (2015). Investigating policy and R&D effects on environmental innovation: A meta-analysis. *Ecological Economics*, *118*, 57-66. https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2015.07.009

Ghoseiri, K. et Ghannadpour, S. F. (2010). Multi-objective vehicle routing problem with time windows using goal programming and genetic algorithm. *Applied Soft Computing Journal*, *10*(4), 1096-1107. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2010.04.001

Ghosh, S. et Srivastava, B. K. (2022). The functioning of dynamic capabilities: explaining the role of organizational innovativeness and culture. *European*

Journal of Innovation Management, *25*(4), 948-974. https://doi.org/10.1108/EJIM-06-2020-0241

Glover, F. (1989). Tabu Search—Part I. *ORSA Journal on Computing*, *1*(3), 190-206. https://doi.org/10.1287/ijoc.1.3.190

Glover, F. (1990). Tabu Search—Part II. *ORSA Journal on Computing*, *2*(1), 4-32. https://doi.org/10.1287/ijoc.2.1.4

Goldkuhl, G. (2012a). Design research in search for a paradigm: Pragmatism is the answer. *Communications in Computer and Information Science*, *286 CCIS*, 84-95. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33681-2_8/COVER

Goldkuhl, G. (2012b). Pragmatism vs interpretivism in qualitative information systems research. *European Journal of Information Systems*, *21*(2), 135-146. https://doi.org/10.1057/EJIS.2011.54/METRICS

Gonzalez, R. A. et Sol, H. G. (2012). Validation and Design Science Research in Information Systems. Dans *Research Methodologies, Innovations and Philosophies in Software Systems Engineering and Information Systems* (p. 403-426). IGI Global. https://doi.org/10.4018/978-1-4666-0179-6.CH021

Gouvernement du Canada. (2025). *Mise à jour de L'approche pancanadienne pour une tarification de la pollution par le carbone 2023-2030 - Canada.ca*. https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/fonctionnement-tarification-pollution/tarification-pollution-carbone-modele-federal-information/modele-federal-2023-2030.html

Gouvernement du Québec. (2021). *Marché du carbone : Crédits compensatoires*. https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/carbone/credits-compensatoires/index.htm

Gouvernement du Québec. (2026). *Exigences liées au développement durable et à l'environnement dans les contrats publics*. https://www.quebec.ca/gouvernement/faire-affaire-gouvernement/gestion-contrats-gouvernementaux/gestion-contractuelle/autres-exigences/exigences-developpement-durable-environnement

Gouvernement du Québec, S. web. (2020). *Contrats - Transports Québec*. https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/entreprises-partenaires/entreprises-reseaux-routier/contrats/Pages/contrats.aspx

Gregg, D. G., Kulkarni, U. R. et Vinzé, A. S. (2001). Understanding the Philosophical Underpinnings of Software Engineering Research in Information Systems.

Information Systems Frontiers, *3*(2), 169-183. https://doi.org/10.1023/A:1011491322406/METRICS

Guedes, M., Pires, J. C. M., Martins, F. G., Lucas, C. S., Claro, H., Pereira, M. F. R. et Dias, J. M. (2025). Development of a tool to enhance street cleaning service efficiency: The case study of Porto city, Portugal. *Waste Management and Research*. https://doi.org/10.1177/0734242X251387004

Gulia, D., Arora, S. et Rahul, K. (2025). Mapping the Scientific Shreds on Barriers to SMEs' Innovation. *SEDME (Small Enterprises Development, Management & Extension Journal)*, *52*(1), 38-51. https://doi.org/10.1177/09708464241291290

Halonen, K. M. (2021). Is public procurement fit for reaching sustainability goals? A law and economics approach to green public procurement. *Maastricht Journal of European and Comparative Law*, *28*(4), 535-555. https://doi.org/10.1177/1023263X211016756

Han, H. et Cueto, E. P. (2015). Waste Collection Vehicle Routing Problem: Literature Review. *PROMET - Traffic&Transportation*, *27*(4), 345-358.

Han, Q., Blaauwbroek, S. et Lee, P. H. (2024). Environment Performance Criteria as Means for Green Public Procurement. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, *378*, 11-22. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8501-2_2

Hang, C. C. et Chen, J. (2021). Innovation management research in the context of developing countries: Analyzing the disruptive innovation framework. *International Journal of Innovation Studies*, *5*(4), 145-147. https://doi.org/10.1016/J.IJIS.2021.09.001

Hansen, P., Mladenović, N. et Moreno Pérez, J. A. (2010). Variable neighbourhood search: Methods and applications. *Annals of Operations Research*, *175*(1), 367-407.

Henao-García, E. A. et Cardona Montoya, R. A. (2024). Management innovation and its relation to innovation outcomes and firm performance: a systematic literature review and future research agenda. *European Journal of Innovation Management*, *27*(8), 2393-2418. https://doi.org/10.1108/EJIM-10-2022-0564

Herbert A, S. (1969). *The Sciences of the Artificial*. MIT Press, Cambridge, MA.

Hesam Sadati, M. E., Çatay, B. et Aksen, D. (2021). An efficient variable neighborhood search with tabu shaking for a class of multi-depot vehicle routing problems. *Computers & Operations Research*, *133*, 105269. https://doi.org/10.1016/J.COR.2021.105269

Hevner, A. R. (2007). A Three Cycle View of Design Science Research. *Scandinavian Journal of Information Systems*, *19*(2).

Heyden, M. L. M., Sidhu, J. S. et Volberda, H. W. (2018). The Conjoint Influence of Top and Middle Management Characteristics on Management Innovation. *Journal of Management*, *44*(4), 1505-1529. https://doi.org/10.1177/0149206315614373

Hock-Doepgen, M., Clauss, T., Kraus, S. et Cheng, C. F. (2021). Knowledge management capabilities and organizational risk-taking for business model innovation in SMEs. *Journal of Business Research*, *130*, 683-697. https://doi.org/10.1016/J.JBUSRES.2019.12.001

Holland, J. (1975). Adaptation in natural and artificial systems. *University of Michigan Press, Ann Arbor*.

Ibarra, D., Bigdeli, A. Z., Igartua, J. I. et Ganzarain, J. (2020). Business Model Innovation in Established SMEs: A Configurational Approach. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity 2020, Vol. 6, Page 76*, *6*(3), 76. https://doi.org/10.3390/JOITMC6030076

Igarashi, M., De Boer, L. et Michelsen, O. (2015). Investigating the anatomy of supplier selection in green public procurement. *Journal of Cleaner Production*, *108*, 442-450. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.08.010

IISD. (2024). Monitoring Progress in Green Public Procurement, Methods, challenges, and case studies. International Institute for Sustainable Development.

Indrawati, H., Caska, H. et Suarman, H. (2020). Barriers to technological innovations of SMEs: how to solve them? *International Journal of Innovation Science*, *12*(5), 545-564. https://doi.org/10.1108/IJIS-04-2020-0049

Ingaldi, M. et Ulewicz, R. (2019). Problems with the Implementation of Industry 4.0 in Enterprises from the SME Sector. *Sustainability 2020, Vol. 12, Page 217*, *12*(1), 217. https://doi.org/10.3390/SU12010217

Ismail, S. Ben, Legras, F. et Coppin, G. (2011). *Synthèse du problème de routage de véhicules*. Institut TELECOM/TELECOM Bretagne.

Janssen, M. J., Castaldi, C. et Alexiev, A. (2016). Dynamic capabilities for service innovation: conceptualization and measurement. *R and D Management*, *46*(4), 797-811. https://doi.org/10.1111/RADM.12147

Jegen, M. (2023). Life cycle assessment: from industry to policy to politics. *The International Journal of Life Cycle Assessment 2023 29:4*, *29*(4), 597-606. https://doi.org/10.1007/S11367-023-02273-8

Jeon, G., Leep, H. R. et Shim, J. Y. (2007). A vehicle routing problem solved by using a hybrid genetic algorithm. *Computers and Industrial Engineering*, *53*(4), 680-692. https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.06.031

Jeong, C. H., Fang, C. et Evans, G. (2025). Spatial variation of resuspended particulate matter in urban environments and real-world assessment of street sweeping. *Environmental Pollution*, *373*, 126-165. https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2025.126165

Johnson, P. F. et Klassen, R. D. (2022). New directions for research in green public procurement: The challenge of inter-stakeholder tensions. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, *3*, 100017. https://doi.org/10.1016/J.CLSCN.2021.100017

Kabadurmus, O. et Erdogan, M. S. (2023). A green vehicle routing problem with multi-depot, multi-tour, heterogeneous fleet and split deliveries: a mathematical model and heuristic approach. *Journal of Combinatorial Optimization*, *45*(3). https://doi.org/10.1007/s10878-023-01016-7

Kannan, S. et Gambetta, N. (2025). Technology-driven Sustainability in Small and Medium-sized Enterprises: A Systematic Literature Review. *Journal of Small Business Strategy*, *35*(1), 129-157. https://doi.org/10.53703/001C.126636

Katoch, S., Chauhan, S. S. et Kumar, V. (2021). A review on genetic algorithm: past, present, and future. *Multimedia Tools and Applications*, *80*(5), 8091-8126. https://doi.org/10.1007/S11042-020-10139-6/FIGURES/8

Kinable, J., van Hoeve, W. J. et Smith, S. F. (2016). *Optimization models for a real-world snow plow routing problem* (vol. 9676, p. 229-245). https://doi.org/10.1007/978-3-319-33954-2_17

Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. et Vecchi, M. P. (1983). Optimization by Simulated Annealing. *Science*, *220*(4598), 671-680. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.220.4598.671

Kitsios, F. C. et Grigoroudis, E. (2020). Evaluating service innovation and business performance in tourism: a multicriteria decision analysis approach. *Management Decision*, *58*(11), 2429-2453. https://doi.org/10.1108/MD-09-2019-1326

Kochetkov, D. M. (2023). Innovation: A state-of-the-art review and typology. *International Journal of Innovation Studies*, *7*(4), 263-272. https://doi.org/10.1016/J.IJIS.2023.05.004

Koskela, L., Paavola, S. et Kroll, E. (2018). The Role of Abduction in Production of New Ideas in Design. *Design Research Foundations*, 153-183. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73302-9_8/COVER

Kraiem, A., Audy, J. F. et Lamghari, A. (2025). Mixed integer linear programming model for a multi-depot arc routing problem with different arc types and flexible assignment of end depot. *Transportation Research Procedia*, *82*, 1109-1119. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.12.115

Krieger, B. et Zipperer, V. (2022). Does green public procurement trigger environmental innovations? *Research Policy*, *51*(6), 104516. https://doi.org/10.1016/J.RESPOL.2022.104516

Kroeze, J. H. (2011). Interpretivism in Information Systems: A Postmodern Epistemology? *All Sprouts Content*, *11*(171).

Kumar, S., Raut, R. D., Aktas, E., Narkhede, B. E. et Gedam, V. V. (2023). Barriers to adoption of industry 4.0 and sustainability: a case study with SMEs. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, *36*(5), 657-677. https://doi.org/10.1080/0951192X.2022.2128217

Kundu, O., James, A. D. et Rigby, J. (2020). Public procurement and innovation: a systematic literature review. *Science and Public Policy*, *47*(4), 490-502. https://doi.org/10.1093/SCIPOL/SCAA029

Kuo, Y. et Wang, C. C. (2012). A variable neighborhood search for the multi-depot vehicle routing problem with loading cost. *Expert Systems with Applications*, *39*(8), 6949-6954. https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2012.01.024

Lahyani, R., Gouguenheim, A. L. et Coelho, L. C. (2019). A hybrid adaptive large neighbourhood search for multi-depot open vehicle routing problems. *International Journal of Production Research*, *57*(22), 6963-6976. https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1572929

Lamghari, A., Foutlane, O. et Audy, J. F. (2026). Efficient routing for spring sweeping operations: A node-based model and decomposition strategies. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, *37*, 101985. https://doi.org/10.1016/J.TRIP.2026.101985

Laporte, G., Musmanno, R. et Vocaturo, F. (2010). An adaptive large neighbourhood search heuristic for the capacitated arc-routing problem with stochastic demands. *Transportation Science*, *44*(1), 125-135. https://doi.org/10.1287/trsc.1090.0290

Lăzăroiu, G., Ionescu, L., Uţă, C., Hurloiu, I., Andronie, M. et Dijmarescu, I. (2020). Environmentally Responsible Behavior and Sustainability Policy Adoption in Green Public Procurement. *Sustainability*, *12*(5), 2110. https://doi.org/10.3390/SU12052110

Leal, A. R., Perez-Castillo, D., Amorós, J. E. et Husted, B. W. (2020). Municipal Green Purchasing in Mexico: Policy Adoption and Implementation Success.

Sustainability 2020, Vol. 12, Page 8339, *12*(20), 8339. https://doi.org/10.3390/SU12208339

Leclerc, A.-M. (2020). *Cahier des charges et devis généraux, infrastructures routières, services de nature technique* (édité par Direction des normes et des documents d'ingénierie du ministère des Transports du Québec). Bibliothèque et Archives nationales du Québec.

Li, H. et Meng, X. (2025). Variable Neighborhood Search for Bi-Objective Heterogeneous Depots Vehicle Routing Problem With Sequential Visiting. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. https://doi.org/10.1109/TITS.2025.3642165

Li, J., Li, Y. et Pardalos, P. M. (2014). Multi-depot vehicle routing problem with time windows under shared depot resources. *Advanced Course on Data Science and Machine Learning*, *31*(2), 515-532.

Li, N. et Li, G. (2022). Hybrid partheno-genetic algorithm for multi-depot perishable food delivery problem with mixed time windows. *Annals of Operations Research 2022 354:2*, *354*(2), 757-788. https://doi.org/10.1007/s10479-022-04747-8

Lichère, F. (2025). *Green public procurement : lessons from the fields : Canada, France, Italy, Portugal, Netherlands and Switzerland*. Presses de l'Université Laval.

Lima Rua, O., Musiello-Neto, F. et Arias-Oliva, M. (2023). Linking open innovation and competitive advantage: the roles of corporate risk management and organisational strategy. *Baltic Journal of Management*, *18*(1), 104-121. https://doi.org/10.1108/BJM-08-2021-0309

Lindfors, A. et Ammenberg, J. (2021). Using national environmental objectives in green public procurement: Method development and application on transport procurement in Sweden. *Journal of Cleaner Production*, *280*, 124821. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.124821

Liu, G., Yang, H., Zhao, H. et Zhiwei, D. W. (2024). A Two-stage heuristic framework for location-arc routing optimization for a fleet of street sweepers. *Proceedings of the IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, CIS*, (2024), 168-173. https://doi.org/10.1109/CIS-RAM61939.2024.10673198

Liu, J., Ma, Y., Appolloni, A. et Cheng, W. (2021). How external stakeholders drive the green public procurement practice? An organizational learning perspective. *Journal of Public Procurement*, *21*(2), 138-166. https://doi.org/10.1108/JOPP-04-2020-0035

Liu, K. et Shi, J. (2015). A Systematic Approach for Business Data Analytics with a Real Case Study. *International Journal of Business Analytics*, *2*(4), 23-44. https://doi.org/10.4018/IJBAN.2015100102:

Liu, L., Cui, L., Han, Q. et Zhang, C. (2024). The impact of digital capabilities and dynamic capabilities on business model innovation: the moderating effect of organizational inertia. *Humanities and Social Sciences Communications 2024 11:1*, *11*(1), 420-. https://doi.org/10.1057/s41599-024-02910-z

Londoño, A. A., González, W. G., Giraldo, O. D. M. et Escobar, J. W. (2024). A hybrid heuristic approach for the multi-objective multi depot vehicle routing problem. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, *15*(1), 337-354. https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2023.9.006

Lu, X., Wijayaratna, K., Huang, Y. et Qiu, A. (2022). AI-Enabled Opportunities and Transformation Challenges for SMEs in the Post-pandemic Era: A Review and Research Agenda. *Frontiers in Public Health*, *10*, 885067. https://doi.org/10.3389/FPUBH.2022.885067/BIBTEX

Lugovoi, I., Andritsos, D. A. et Senot, C. (2022). Novelty and scope of process innovation: The role of related and unrelated manufacturing experience. *Production and Operations Management*, *31*(10), 3877-3895. https://doi.org/10.1111/POMS.13793

Lundberg, S., Marklund, P. O., Strömbäck, E. et Sundström, D. (2015). Using public procurement to implement environmental policy: an empirical analysis. *Environmental Economics and Policy Studies*, *17*(4), 487-520. https://doi.org/10.1007/S10018-015-0102-9/TABLES/7

Luo, M., Teng, M., Gao, C., Li, X. et Wang, Z. (2024). A Multi-objective Variable Tabu Neighborhood Search Algorithm for Multiple Depot Vehicle Routing Problem in Epidemics. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, *14862 LNCS*, 511-522. https://doi.org/10.1007/978-981-97-5578-3_42

Ma, Y., Liu, Y., Appolloni, A. et Liu, J. (2020). Does green public procurement encourage firm's environmental certification practice? The mediation role of top management support. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, *28*(3), 1002-1017. https://doi.org/10.1002/CSR.2101

Mahmud, N. et Haque, M. M. (2019). Solving Multiple Depot Vehicle Routing Problem (MDVRP) using Genetic Algorithm. *2nd International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering, ECCE 2019*, 1-6. https://doi.org/10.1109/ECACE.2019.8679429

Mancini, S. (2016). A real-life Multi Depot Multi Period Vehicle Routing Problem with a Heterogeneous Fleet: Formulation and Adaptive Large Neighborhood Search based Matheuristic. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *70*, 100-112. https://doi.org/10.1016/J.TRC.2015.06.016

March, l. (1976). The logic of design and the question of value. *The Architecture of Form*. https://doi.org/10.11225/JCSS.17.389

March, S. T. et Smith, G. F. (1995). Design and natural science research on information technology. *Decision Support Systems*, *15*(4), 251-266. https://doi.org/10.1016/0167-9236(94)00041-2

Mark, S., Philip, L. et Adrian, T. (2009). *Research methods for business students*.

Markov, I., Varone, S. et Bierlaire, M. (2016). Integrating a heterogeneous fixed fleet and a flexible assignment of destination depots in the waste collection VRP with intermediate facilities. *Transportation Research Part B: Methodological*, *84*, 256-273.

Markovic, S. et Bagherzadeh, M. (2018). How does breadth of external stakeholder co-creation influence innovation performance? Analyzing the mediating roles of knowledge sharing and product innovation. *Journal of Business Research*, *88*, 173-186. https://doi.org/10.1016/J.JBUSRES.2018.03.028

Mélon, L. (2020). More than a nudge? Arguments and tools for mandating green public procurement in the EU. *Sustainability (Switzerland)*, *12*(3). https://doi.org/10.3390/SU12030988

Menon, R. R. et Ravi, V. (2022). Using AHP-TOPSIS methodologies in the selection of sustainable suppliers in an electronics supply chain. *Cleaner Materials*, *5*, 100130. https://doi.org/10.1016/J.CLEMA.2022.100130

Milijaš, R., Peti, M., Stuhne, D., Vasiljević, G., Kovačić, Z. et Mader, M. (2023). Towards an Environmentally-friendly Street Sweeping Vehicle with Reduced Water Consumption. *4th International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering, ICECCE 2023*. https://doi.org/10.1109/ICECCE61019.2023.10442147

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2013). *La lutte contre les changements climatiques : Gagnant pour le Québec. Gagnant pour la planète.*

Mladenović, N. et Hansen, P. (1997). Variable neighborhood search. *Computers and Operations Research*, *24*(11), 1097-1100. https://doi.org/10.1016/S0305-0548(97)00031-2

Mohapatra, S. et Thakurta, R. (2019). Cloud-based business model for SMEs sector in India – Developed and validated cloud computing adoption factors through a study on Indian SMEs. *International Journal of Business Innovation and Research*, *20*(3), 354-374. https://doi.org/10.1504/IJBIR.2019.102721

Mokhbi, S., Assaf, G. J. et 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.

Morley, A. (2021). Procuring for change: An exploration of the innovation potential of sustainable food procurement. *Journal of Cleaner Production*, *279*, 123410. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.123410

Mugogo, M. et Midala, A. (2020). Barriers to SME innovation for performance: evidence from Zimbabwe. *International Journal of Education and Research*, *8*(11), 45-58. https://ijern.com/journal/2020/November-2020/03.pdf

Müller, J. M., Buliga, O. et Voigt, K. I. (2018). Fortune favors the prepared: How SMEs approach business model innovations in Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, *132*, 2-17. https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2017.12.019

Munodawafa, R. T. et Johl, S. K. (2022). Measurement development for eco-innovation capabilities of Malaysian oil and gas firms. *International Journal of Productivity and Performance Management*, *71*(8), 3443-3465. https://doi.org/10.1108/IJPPM-07-2020-0404

Nichifor, E., Lixăndroiu, R. C., Maican, C. I., Sumedrea, S., Chițu, I. B., Tecău, A. S. et Brătucu, G. (2022). Unlocking the Entrepreneurial State of Mind for Digital Decade: SMEs and Digital Marketing. *Electronics 2022, Vol. 11, Page 2358*, *11*(15), 2358. https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS11152358

Nongwe, O. et Shatta, D. (2025). The Influence of Green Supplier Selection Practices on Social Performance in Tanzanian Hospitals: an Evidence From Muhimbili National Hospital. *International Journal Papier Public Review*, *6*(3), 109-126. https://doi.org/10.47667/IJPPR.V6I3.390

Nunes Bezerra, S., Souza, M. J. F., de Souza, S. R. et Nazário Coelho, V. (2018). A VNS-Based Algorithm with Adaptive Local Search for Solving the Multi-Depot Vehicle Routing Problem. *In International Conference on Variable Neighborhood Search*, 167-181. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15843-9_14

OECD. (2015). *The Innovation Imperative in the Public Sector: Setting an Agenda for Action*. *The Innovation Imperative in the Public Sector*. OECD. https://doi.org/10.1787/9789264236561-EN

OECD. (2016). *Measuring the Link between Public Procurement and Innovation*. *OECD Science, Technology and Industry Working Papers*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/5JLVC7SL1W7H-EN

OECD. (2024). Harnessing Public Procurement for the Green Transition: Good Practices in OECD Countries. OECD Public Governance Reviews. OECD Publishing. https://doi.org/https://doi.org/10.1787/e551f448-en

OECD. (2025a). *Government at a Glance 2025*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/0EFD0BCD-EN

OECD. (2025b, 19 juin). Promouvoir les marchés publics stratégiques et écologiques en France: Professionnaliser la fonction achats de l'État. *Examens de l'OCDE sur la gouvernance publique*. Éditions OCDE. https://doi.org/10.1787/CF126D7B-FR

Ograh, T., Ayarkwa, J., Acheampong, A. et Abu, I. M. (2025). Advancing collaboration toward green supplier selection: perspective of green relational capital. *Journal of Public Procurement*, *25*(1), 64-94. https://doi.org/10.1108/JOPP-04-2024-0046

Ograh, T., Ayarkwa, J., Acheampong, A. et Osei-Asibey, D. (2023). Developing green knowledge toward supplier selection: a green intellectual capital perspective. *Journal of Public Procurement*, *23*(3-4), 389-415. https://doi.org/10.1108/JOPP-04-2023-0020

Omowole, B. M., Olufemi-Philips, A. Q., Ofadile, O. C., Eyo-Udo, N. L. et Ewim, S. E. (2024). Barriers and drivers of digital transformation in SMEs: A conceptual analysis. *International Journal of Frontline Research in Multidisciplinary Studies*, *5*(2), 19-36.

Oppen, J. et Løkketangen, A. (2006). Arc routing in a node routing environment. *Computers and Operations Research*, *33*(4), 1033-1055. https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.09.004

Orfanidou, V. S., Rachaniotis, N. P., Tsoulfas, G. T. et Chondrokoukis, G. P. (2023). Life Cycle Costing Implementation in Green Public Procurement: A Case Study from the Greek Public Sector. *Sustainability 2023, Vol. 15, Page 2817*, *15*(3), 2817. https://doi.org/10.3390/SU15032817

Orsatti, G., Perruchas, F., Consoli, D. et Quatraro, F. (2020). Public Procurement, Local Labor Markets and Green Technological Change. Evidence from US Commuting Zones. *Environmental and Resource Economics*, *75*(4), 711-739. https://doi.org/10.1007/S10640-020-00405-4/FIGURES/6

Oz, B. (2024). A non-price-based tender evaluation methodology considering tenderers' self-confidence with partial value functions and time decay analysis. *Expert Systems with Applications*, *252*, 124186. https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2024.124186

Paes, M. X., Picavet, M. E. B. et Puppim de Oliveira, J. A. (2025). Innovation in small municipalities: The case of waste management. *Habitat International*, *165*, 103554. https://doi.org/10.1016/J.HABITATINT.2025.103554

Pan, J., Ye, J., Ai, H., Wang, J. et Wan, Y. (2023). Parameter optimization of a pure electric sweeper dust port by a backpropagation neural network combined with a whale algorithm. *Mechanical Sciences*, *14*(1), 47-60. https://doi.org/10.5194/MS-14-47-2023

Parikka-Alhola, K. et Nissinen, A. (2012). Environmental impacts and the most economically advantageous tender in public procurement. *Journal of Public Procurement*, *12*(1), 43-80. https://doi.org/10.1108/JOPP-12-01-2012-B002/FULL/PDF

Parsons, T., Baghyari, F., Seo, J., Kim, W. et Lee, M. (2024). Advanced Path Planning for Autonomous Street-Sweeper Fleets under Complex Operational Conditions. *Robotics 2024, Vol. 13, Page 37*, *13*(3), 37. https://doi.org/10.3390/ROBOTICS13030037

Parsons, T., Seo, J. et Livesey, D. (2025). Municipal street-sweeping area generation with route optimization. *International Transactions in Operational Research*, *32*(3), 1375-1399. https://doi.org/10.1111/ITOR.13515

Parthanadee, P. et Logendran, R. (2006). Periodic product distribution from multi-depots under limited supplies. *IIE Transactions*, *38*(11), 1009-1026. https://doi.org/10.1080/07408170600575454

Paul, A., Kumar, R. S., Rout, C. et Goswami, A. (2021). Designing a multi-depot multi-period vehicle routing problem with time window: hybridization of tabu search and variable neighbourhood search algorithm. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, *46*(3), 1-11. https://doi.org/10.1007/S12046-021-01693-2/TABLES/6

Peffers, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A. et Chatterjee, S. (2007). A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. *Journal of Management Information Systems*, *24*(3), 45-77. https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302

Pereira, M. A., Coelho, L. C., Lorena, L. A. N. et De Souza, L. C. (2015). A hybrid method for the Probabilistic Maximal Covering Location–Allocation Problem.

Computers & Operations Research, *57*, 51-59. https://doi.org/10.1016/J.COR.2014.12.001

Pircher, B. (2019). EU public procurement policy: the economic crisis as trigger for enhanced harmonisation. *Journal of European Integration*, *42*(4), 509-525. https://doi.org/10.1080/07036337.2019.1666114

Pisinger, D. et Ropke, S. (2007). A general heuristic for vehicle routing problems. *Computers and Operations Research*, *34*(8), 2403-2435. https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.09.012

Pokhrel, A. et Awasthi, K. D. (2025). Advancing Sustainable Procurement: Drivers, Barriers, and Strategic Framework from Nepal as a Developing Country Case. https://doi.org/10.20944/PREPRINTS202508.1954.V1

Polacek, M., Benkner, S., Doerner, K. F. et Hartl, R. F. (2008). A cooperative and adaptive variable neighborhood search for the multi depot vehicle routing problem with time windows. *Business Research*, *1*(2), 207-218.

Polacek, Michael, Hartl, R. F., Doerner, K. et Reimann, M. (2004). A Variable Neighborhood Search for the Multi Depot Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Journal of Heuristics*, *10*(6), 613-627.

Polukarova, M., Markiewicz, A., Björklund, K., Strömvall, A. M., Galfi, H., Andersson Sköld, Y., Gustafsson, M., Järlskog, I. et Aronsson, M. (2020). Organic pollutants, nano- and microparticles in street sweeping road dust and washwater. *Environment International*, *135*, 105-337. https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2019.105337

Prag, A. A., Abrahams, J. B., Daniele, F., Dodhia, M. S., Feng, C., Hahn, K., Kristiansen, S., Leitner, A. M., Mendez, J. P., Mohr, M., Møller, S. F., Svensson, S. Y., Talbot, K. L. P., Tomulescu, I., Valachova, B., Zahra, F., Lysák, M. et Henriksen, C. B. (2023). Scenarios for Reducing Greenhouse Gas Emissions from Food Procurement for Public School Kitchens in Copenhagen. *Sustainability*, *15*(17). https://doi.org/10.3390/SU151713002

Purao, S. (2013). Truth or Dare: The Ontology Question in Design Science Research. *Journal of Database Management (JDM)*, *24*(3), 51-66. https://doi.org/10.4018/JDM.2013070104

Quirion-Blais, O., Langevin, A., Lehuédé, F., Péton, O. et Trépanier, M. (2017). Solving the large-scale min-max K-rural postman. *Networks*, *70*(3), 195-215.

Radicic, D. et Jackson, I. (2025). Effectiveness of Green Public Procurement in Stimulating Green Products and Resource Efficiency in SMEs: Empirical

Analysis of the EU Industries. *Business Strategy and the Environment*, *0*, 1-17. https://doi.org/10.1002/BSE.70102

Ragazzi, M., Zuccato, C., Schiavon, M. et Rada, E. C. (2023). Overview and possible approach to street sweeping criticalities. *Energy Reports*, *9*, 117-124. https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2023.05.245

Rainville, A. (2017). Standards in green public procurement – A framework to enhance innovation. *Journal of Cleaner Production*, *167*, 1029-1037. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.10.088

Rainville, A. (2022). Green Public Procurement in Mission-Orientated Innovation Systems: Leveraging Voluntary Standards to Improve Sustainability Performance of Municipalities. *Sustainability 2022, Vol. 14, Page 8591*, *14*(14), 8591. https://doi.org/10.3390/SU14148591

Ramachandiran, R., Ramapraba, R. et Suresh Joseph, K. (2019, 1 mars). *Multi depot vehicle routing problem using ODV EV based genetic algorithm*. https://doi.org/10.1109/ICSCAN.2019.8878869

Ratoavinarivo, J. (2018). *Évolution et structuration du marché des crédits compensatoires d'émissions de carbone au Québec entre 1999 et 2015 : une analyse des réseaux*.

Reinerth, D., Busse, C. et Wagner, S. M. (2019). Using Country Sustainability Risk to Inform Sustainable Supply Chain Management: A Design Science Study. *Journal of Business Logistics*, *40*(3), 241-264. https://doi.org/10.1111/JBL.12190

Repoussis, P. P., Tarantilis, C. D. et Ioannou, G. (2009). An evolutionary algorithm for the open vehicle routing problem with time windows. *Studies in Computational Intelligence*, *161*, 55-75. https://doi.org/10.1007/978-3-540-85152-3_3

Revez, A., Kirrane, M. et Thomson, F. (2023). Greening procurement: Exploring evolving practices in an Irish university. *Heliyon*, *9*(11), e21787. https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2023.E21787

Rietbergen, M. G. et Blok, K. (2013). Assessing the potential impact of the CO2 Performance Ladder on the reduction of carbon dioxide emissions in the Netherlands. *Journal of Cleaner Production*, *52*, 33-45. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2013.03.027

roman, lutz. (2014). *Adaptive Large Neighborhood Search*. ulm.

Ropke, S. et Pisinger, D. (2006). An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows. *Transportation Science*, *40*(4), 455-472. https://doi.org/10.1287/trsc.1050.0135

Rubio-Calderón, L. C., Zafra-Mejía, C. A. et Rondón-Quintana, H. A. (2025). Dynamic Simulation Model for Urban Street Sweeping: Integrating Performance and Citizen Perception. *Urban Science*, *9*(12), 518. https://doi.org/10.3390/urbansci9120518

Sacramento, D., Pisinger, D. et Ropke, S. (2019). An adaptive large neighborhood search metaheuristic for the vehicle routing problem with drones. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *102*, 289-315. https://doi.org/10.1016/J.TRC.2019.02.018

Sadati, M. E. H. et Çatay, B. (2021). A hybrid variable neighborhood search approach for the multi-depot green vehicle routing problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *149*, 102293. https://doi.org/10.1016/J.TRE.2021.102293

Salazar-Aguilar, M. A., Langevin, A. et Laporte, G. (2012). Synchronized arc routing for snow plowing operations. *Computers and Operations Research*, *39*(7), 1432-1440. https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.08.014

Salhi, S., Imran, A. et Wassan, N. A. (2014). The multi-depot vehicle routing problem with heterogeneous vehicle fleet: Formulation and a variable neighborhood search implementation. *Computers and Operations Research*, *52*, 315-325. https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.05.011

Samanta, S. et MK, J. (2013). Multi depot probabilistic vehicle routing problems with a time window: theory, solution and application. *In Optimizing, Innovating, and Capitalizing on Information Systems for Operations*, 251-273.

Sapir, A., Schraepen, T. et Tagliapietra, S. (2022). Green Public Procurement: A Neglected Tool in the European Green Deal Toolbox? *Intereconomics*, *57*(3), 175-178. https://doi.org/10.1007/S10272-022-1044-7/METRICS

Saudi, M. H. M., Sinaga, O., Roespinoedji, D. et Razimi, M. S. A. (2019). Environmental sustainability in the fourth industrial revolution: The nexus between green product and green process innovation. *International Journal of Energy Economics and Policy*, *9*(5), 363-370. https://doi.org/10.32479/IJEEP.8281

Scherz, M., Kreiner, H., Alaux, N. et Passer, A. (2023). Transition of the procurement process to Paris-compatible buildings: consideration of environmental life cycle costing in tendering and awarding. *International Journal of Life Cycle Assessment*, *28*(7), 843-861. https://doi.org/10.1007/S11367-023-02153-1/TABLES/2

Schmid, V., Doerner, K. F., Hartl, R. F. et Salazar-González, J. J. (2010). Hybridization of very large neighborhood search for ready-mixed concrete delivery problems.

Computers and Operations Research, *37*(3), 559-574. https://doi.org/10.1016/j.cor.2008.07.010

Schumpeter, J. (2021). The theory of economic development with a new introduction by Richard Swedberg. *The Theory of Economic Development*, 254. https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9781003146766/theory-economic-development-joseph-schumpeter-richard-swedberg

Schvaneveldt, R. W. et Cohen, T. A. (2010). Abductive reasoning and similarity: Some computational tools. *Computer-Based Diagnostics and Systematic Analysis of Knowledge*, 189-211. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5662-0_11/COVER

Secrétariat du Conseil du trésor du Québec. (2025). *Obtenir un contrat avec un organisme public*. https://www.tresor.gouv.qc.ca/faire-affaire-avec-letat/les-contrats-au-gouvernement/obtenir-un-contrat/avec-un-organisme-public/

Sharma, R. et Saini, S. (2020, 1 juillet). *Heuristics and Meta-Heuristics Based Multiple Depot Vehicle Routing Problem: A Review* (p. 683-689). https://doi.org/10.1109/ICESC48915.2020.9155814

Shaw, P. (1998). Using Constraint Programming and Local Search Methods to Solve Vehicle Routing Problems. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, *1520*, 417-431. https://doi.org/10.1007/3-540-49481-2_30

Shen, L., Tao, F. et Wang, S. (2018). Multi-Depot Open Vehicle Routing Problem with Time Windows Based on Carbon Trading. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *15*(9), 2025. https://doi.org/10.3390/ijerph15092025

Shin, D.-I. (2017). An exploratory study of innovation strategies of the internet of things SMEs in South Korea. *Asia Pacific Journal of Innovation and Entrepreneurship*, *11*(2), 171-189. https://doi.org/10.1108/APJIE-08-2017-025

Shin, J., Kim, Y. J., Jung, S. et Kim, C. (2022). Product and service innovation: Comparison between performance and efficiency. *Journal of Innovation & Knowledge*, *7*(3), 100191. https://doi.org/10.1016/J.JIK.2022.100191

Similä, J. O. et Mwesiumo, D. (2024). Implementing public procurement of green innovations: Does structural alignment matter? *Journal of Cleaner Production*, *461*, 142562. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2024.142562

Smith, M. J. (1998). *Social science in question* (Sage).

Song, Y., Liu, Y., Liu, T. et Long, R. (2023). Tabu search based on variable neighborhood and its application to multi-depot vehicle routing problem.

International Conference on Intelligent Systems, Communications, and Computer Networks (ISCCN 2023), *12702*, 326-330. https://doi.org/10.1117/12.2679582

Sönnichsen, S. D. et Clement, J. (2020). Review of green and sustainable public procurement: Towards circular public procurement. *Journal of Cleaner Production*, *245*, 118901. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.118901

Stojčić, N. (2021). Social and private outcomes of green innovation incentives in European advancing economies. *Technovation*, *104*, 102270. https://doi.org/10.1016/J.TECHNOVATION.2021.102270

Stokke, R., Kristoffersen, F. S., Stamland, M., Holmen, E., Hamdan, H. et De Boer, L. (2022). The role of green public procurement in enabling low-carbon cement with CCS: An innovation ecosystem perspective. *Journal of Cleaner Production*, *363*, 132451. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.132451

Strand, M., Syberfeldt, A. et Geertsen, A. (2020). A decision support system for sustainable waste collection. Dans Information Resources Management Association (dir.), *Waste Management: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications* (vol. 3, p. 347-365).

Stuijts, M., van Grinsven, J. et Berns, J. (2025). Opportunities of public infrastructure procurement to enhance environmental goals: a case study in the South of the Netherlands. *Journal of Public Procurement*. https://doi.org/10.1108/JOPP-04-2025-0041/1300253

Stundziene, A., Pilinkiene, V., Vilkas, M., Grybauskas, A. et Lukauskas, M. (2024). The challenge of measuring innovation types: A systematic literature review. *Journal of Innovation & Knowledge*, *9*(4), 100620. https://doi.org/10.1016/J.JIK.2024.100620

Su, S., Zhu, C. et Li, X. (2019). A dynamic weighting system considering temporal variations using the DTT approach in LCA of buildings. *Journal of Cleaner Production*, *220*, 398-407. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.02.140

Su, Y., Chai, J., Lu, S. et Lin, Z. (2024). Evaluating Green Technology Innovation Capability in Intelligent Manufacturing Enterprises: A Z-Number-Based Model. *IEEE Transactions on Engineering Management*, *71*, 5391-5409. https://doi.org/10.1109/TEM.2024.3350357

Surekha P et Sumathi, S. (2011). Solution To Multi-Depot Vehicle Routing Problem Using Genetic Algorithms. *World Applied Programming*, *1*(3), 118-131.

Tagmouti, M. (2009). *Étude d'un problème de tournées de véhicules sur les arcs avec contraintes de capacité et coûts de service dépendants du temps*. Universite de Montreal, Monreal, P.Q., Canada.

Tagmouti, M., Gendreau, M. et Potvin, J. Y. (2007). Arc routing problems with time-dependent service costs. *European Journal of Operational Research*, *181*(1), 30-39. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.06.028

Tan, W., Chen, X., Teng, M., An, W. et Wu, C. (2025). Navigating the green transition: assessing the impact of Chinese green public procurement on corporate pollution emissions. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, *17*(2), 25-46. https://doi.org/10.1108/IJCCSM-09-2024-0161/FULL/PDF

Taylor, S. P. (2017). What Is Innovation? A Study of the Definitions, Academic Models and Applicability of Innovation to an Example of Social Housing in England. *Open Journal of Social Sciences*, *5*(11), 128-146. https://doi.org/10.4236/JSS.2017.511010

Teoh, M. F., Ahmad, N. H., Abdul-Halim, H. et Ramayah, T. (2025). Is Digital Business Model Innovation the Silver Bullet for SMEs Competitiveness in Digital Era? Evidence from a Developing Nation. *Vision*, *29*(4), 422-437. https://doi.org/10.1177/09722629221074771

Testa, F., Annunziata, E., Iraldo, F. et Frey, M. (2016). Drawbacks and opportunities of green public procurement: an effective tool for sustainable production. *Journal of Cleaner Production*, *112*, 1893-1900. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2014.09.092

Testa, F., Grappio, P., Gusmerotti, N. M., Iraldo, F. et Frey, M. (2015). Examining green public procurement using content analysis: existing difficulties for procurers and useful recommendations. *Environment, Development and Sustainability*. https://doi.org/10.1007/s10668-015-9634-1

Testa, F., Iraldo, F. et Frey, M. (2011). The effect of environmental regulation on firms' competitive performance: The case of the building & construction sector in some EU regions. *Journal of Environmental Management*, *92*(9), 2136-2144. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2011.03.039

Toobaie, S. et Haghani, A. (2004). Minimal Arc Partitioning Problem: Formulation and Application in Snow Routing with Service Route Continuity. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *1882*(1), 167-175. https://doi.org/10.3141/1882-20

Toth, P. et Vigo, D. (2001). *An overview of vehicle routing problems. In The vehicle routing problem*. *Discrete Mathematics and Applications*. Society for Industrial and Applied Mathematics,Philadelphia, PA, USA,. https://doi.org/10.1137/1.9780898718515.CH1

Treviño-Lozano, L., Nelson, V., Pillay, R. G., Dehbi, F. et Gruskin, S. (2021). Sustainable Public Procurement and Human Rights: Barriers to Deliver on

Socially Sustainable Road Infrastructure Projects in Mexico. *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 9605*, *13*(17), 9605. https://doi.org/10.3390/SU13179605

Trovato, M. R., Nocera, F. et Giuffrida, S. (2020). Life-cycle assessment and monetary measurements for the carbon footprint reduction of public buildings. *Sustainability (Switzerland)*, *12*(8). https://doi.org/10.3390/SU12083460

UE. (2016). *Manuel sur les marchés publics écologiques 3 édition*.

Uttam, K. et Le Lann Roos, C. (2015). Competitive dialogue procedure for sustainable public procurement. *Journal of Cleaner Production*, *86*, 403-416. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2014.08.031

van Aken, J., Chandrasekaran, A. et Halman, J. (2016). Conducting and publishing design science research: Inaugural essay of the design science department of the Journal of Operations Management. *Journal of Operations Management*, *47-48*, 1-8. https://doi.org/10.1016/J.JOM.2016.06.004

Van Aken, J. E. (2004). Management Research Based on the Paradigm of the Design Sciences: The Quest for Field-Tested and Grounded Technological Rules. *Journal of Management Studies*, *41*(2), 219-246. https://doi.org/10.1111/J.1467-6486.2004.00430.X

Van Aken, J. E. et Romme, G. (2009). Reinventing the future: adding design science to the repertoire of organization and management studies. *Organization Management Journal*, *6*(1), 5-12. https://doi.org/10.1057/OMJ.2009.1

Vanegas Useche, L. V., Wahab, M. M. A. et Parker, G. A. (2010). Effectiveness of gutter brushes in removing street sweeping waste. *Waste Management*, *30*(2), 174-184. https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2009.09.036

Vanegas-Useche, L. V., Abdel-Wahab, M. M. et Parker, G. A. (2015). Effectiveness of oscillatory gutter brushes in removing street sweeping waste. *Waste Management*, *43*, 28-36. https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2015.05.014

Voigt, S., Frank, M., Fontaine, P. et Kuhn, H. (2022). Hybrid adaptive large neighborhood search for vehicle routing problems with depot location decisions. *Computers & Operations Research*, *146*(3-4), 105856. https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105856

Walker, H. et Brammer, S. (2009). Sustainable procurement in the United Kingdom public sector. *Supply Chain Management*, *14*(2), 128-137. https://doi.org/10.1108/13598540910941993

Wang, H., Wang, C., Ao, Y. et Zhang, X. (2025). Fuzzy control algorithm of cleaning parameters of street sweeper based on road garbage volume grading. *Scientific Reports 2025 15:1*, *15*(1), 1-18. https://doi.org/10.1038/s41598-025-92771-6

Wang, S., Liu, C. et Zhou, Z. (2024). Government-enterprise green collaborative governance and urban carbon emission reduction: Empirical evidence from green PPP programs. *Environmental Research*, *257*, 119335. https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2024.119335

Wang, X., Cheng, L. et Zhao, M. (2025). Green public procurement and corporate ESG information disclosure: a dual institutional perspective. *Journal of Environmental Planning and Management*. https://doi.org/10.1080/09640568.2025.2539342

Washington Stormwater Center. (2026). Chapter 5 – Optimizing Street Sweeping Practices . Dans *Street Sweeping Manual* (p. 1-27). https://www.wastormwatercenter.org/street-sweeping-manual/

Welling, S. et Ryding, S. O. (2021). Distribution of environmental performance in life cycle assessments—implications for environmental benchmarking. *International Journal of Life Cycle Assessment*, *26*(2), 275-289. https://doi.org/10.1007/S11367-020-01852-3

Weng, X., She, W., Fan, H., Zhang, J. et Yun, L. (2024). Multi-depot vehicle routing problem with drones in emergency logistics. *Cluster Computing 2024 28:1*, *28*(1), 64-. https://doi.org/10.1007/s10586-024-04809-5

Witjes, S. et Lozano, R. (2016). Towards a more Circular Economy: Proposing a framework linking sustainable public procurement and sustainable business models. *Resources, Conservation and Recycling*, *112*, 37-44. https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2016.04.015

Wu, Z., Lou, P., Hu, J., Zeng, Y. et Fan, C. (2025). An Adaptive Large Neighborhood Search for a Green Vehicle Routing Problem with Depot Sharing. *Mathematics 2025, Vol. 13, Page 214*, *13*(2), 214. https://doi.org/10.3390/math13020214

Xiuping, L. et Yang, Y. (2022). Does Green Finance Contribute to Corporate Technological Innovation? The Moderating Role of Corporate Social Responsibility. *Sustainability 2022, Vol. 14, Page 5648*, *14*(9), 5648. https://doi.org/10.3390/SU14095648

Xu, S., Chu, C., Ju, M. et Shao, C. (2016). System Establishment and Method Application for Quantitatively Evaluating the Green Degree of the Products in Green Public Procurement. *Sustainability*, *8*(9), 941. https://doi.org/10.3390/SU8090941

Yang, H., Kim, S. Y. et Yim, S. (2019). A case study of the Korean government's preparation for the fourth industrial revolution: Public program to support business model innovation. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, *5*(2), 35. https://doi.org/10.3390/JOITMC5020035

Yang, Q., Zhou, Y., Ying, K., Li, R. et Wang, X. (2018). Study on Cleaning Performance of Small Road Sweeper Vehicle. *Advances in Engineering Research*, 194-198. https://doi.org/10.2991/EAME-18.2018.41

Yang, Yuan-feng. (2008). An Improved Genetic Algorithm for Multiple-depot and Heterogeneous-vehicle Vehicle Routing Problem. *Computer and Modernization*, *9*(2).

Yang, Yuewen et Morotomi, T. (2025). When can green public procurement really stimulate eco-innovation? Considering the role of intellectual capital. *Journal of Cleaner Production*, *492*, 144841. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2025.144841

Ye, B., Wang, Y., Lei, X., Zhang, B., Shang, W., Zhang, F., Sheng, J., Fu, P., Chen, P. et Li, X. (2025). Multi-Depot Vehicle Routing Problem with Collaborative Replenishment Using ALNS–ABC Algorithm. *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering*. https://doi.org/10.1142/S0218194025500834

Yin, R. K. (2009). *Case Study Research: Design and Methods*. SAGE Publications. https://books.google.com/books/about/Case_Study_Research.html?hl=fr&id=FzawIAdilHkC

Yu, B., Xin, J. et D'Ariano, A. (2019). Route Planning of A Sanitation Vehicle in A Dynamic Traffic Environment. *Proceedings - 2019 Chinese Automation Congress, CAC 2019*, 2898-2903. https://doi.org/10.1109/CAC48633.2019.8997003

Yu, C. et Morotomi, T. (2022). Impacts of green public procurement on eco-innovation: evidence from EU countries. *Global Public Policy and Governance*, *2*(2), 154-174. https://doi.org/10.1007/S43508-022-00041-2/TABLES/5

Yurtseven, C. et Gökçe, M. A. (2019). A novel arc-routing problem of electric powered street sweepers with time windows and intermediate stops. *IFAC-PapersOnLine*, *52*(13), 2308-2313.

Zaini, A., Azlina, N. et Rijal, J. K. (2025). Green Supplier Selection Criteria Using Integrated Delphi-Analytic Network Process in Malaysia Public Procurement. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, *15*(3), 547-556. https://doi.org/10.6007/IJARBSS/V15-I3/24418

Zhang, D., Xu, W., Ji, B., Li, S. et Liu, Y. (2020). An adaptive tabu search algorithm embedded with iterated local search and route elimination for the bike repositioning and recycling problem. *Computers & Operations Research*, *123*, 105035. https://doi.org/10.1016/J.COR.2020.105035

Zhang, Z. et Jiang, Y. (2022). Can green public procurement change energy efficiency? Evidence from a quasi-natural experiment in China. *Energy Economics*, *113*, 106244. https://doi.org/10.1016/J.ENECO.2022.106244

Zheng, S. et Wen, J. (2024). Green public procurement and corporate environmental performance: An empirical analysis based on data from green procurement contracts. *International Review of Economics & Finance*, *96*, 103578. https://doi.org/10.1016/J.IREF.2024.103578

Zhou, L., Baldacci, R., Vigo, D. et Wang, X. (2018). A Multi-Depot Two-Echelon Vehicle Routing Problem with Delivery Options Arising in the Last Mile Distribution. *European Journal of Operational Research*, *265*(2), 765-778. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.08.011