



Titre: Étude comparative de stratégies logistiques de collecte de résidus
Title: dans le Port de Montréal

Auteur: Martín Federico Levit
Author:

Date: 2019

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Levit, M. F. (2019). Étude comparative de stratégies logistiques de collecte de
Citation: résidus dans le Port de Montréal [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal].
PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/3891/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/3891/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Jean-Marc Frayret
Advisors:

Programme: Maîtrise recherche en génie industriel
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Étude comparative de stratégies logistiques de collecte de résidus dans le Port
de Montréal**

MARTIN FEDERICO LEVIT

Département de mathématiques et de génie industriel

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie industriel

Avril 2019

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Étude comparative de stratégies logistiques de collecte de résidus dans le Port de Montréal

présenté par **Martin Federico LEVIT**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Michel GAMACHE, président

Jean-Marc FRAYRET, membre et directeur de recherche

Diane RIOPEL, membre

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier le professeur Jean Marc Frayret pour tout son soutien lors de l'élaboration de mon mémoire de maîtrise, pour m'avoir toujours guidé et pour son aide durant les consultations. C'était deux années merveilleuses et je me souviendrai toujours de lui.

Deuxièmement, je veux remercier ma famille de m'avoir encouragé à entreprendre ce projet et de m'avoir soutenu tout au long. Mention spéciale pour mon père Jorge Levit, ma mère Cora Rosenzvit, ma grand-mère Lidia Aizenbud et ma copine Loret Dominguez

RÉSUMÉ

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur une étude de la chaîne logistique opérant dans le port de Montréal, ainsi que le traitement et la simulation de différentes solutions qui améliorent certains aspects logistiques de ce système. Des tonnes de déchets sont générés dans les navires des entreprises maritimes de transport de marchandises, qui sont déversés dans les différents terminaux de l'île de Montréal. Cela génère un défi en termes de traitement et d'élimination finale. Le présent mémoire tente d'améliorer le processus de collecte des déchets, tout en essayant de réduire les coûts associés des partenaires. Le projet a été développé en collaboration avec plusieurs partenaires: Canada Steamship Lines, le Réseau Merlin, le Port de Montréal, le Groupe Desgagnés et Urgence Marine.

ABSTRACT

The work presented in this thesis focuses on a study of the supply chain operating in the Port of Montreal, as well as the treatment and simulation of various solutions that improve the logistics of this system. Tons of waste are generated in the ships of the maritime freight companies, which are delivered in the various terminals of the island of Montreal. This creates a challenge in terms of treatment and final disposal. This thesis attempts to improve the collect of these waste, while trying to reduce the associated costs of the partners. The project was developed in collaboration with several partners: Canada Steamship Lines, the Merlin Network, the Port of Montreal, the Desgagnés Group, and Urgence Marine.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ.....	iv
ABSTRACT	v
TABLE DES MATIÈRES	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES FIGURES.....	xi
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xiv
LISTE DES ANNEXES.....	xv
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Quoi faire avec les déchets.....	1
1.2 Déchets maritimes et dans les ports	2
1.3 Gestion des matières résiduelles dans les ports maritimes.....	2
CHAPITRE 2 REVUE LITTÉRATURE.....	5
2.1 Stratégies de collecte des déchets dans le monde	5
2.2 Utilisation de la technologie dans la collecte des déchets.....	7
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE	10
3.1 Étapes méthodologiques.....	10
3.2 Partenaires	11
CHAPITRE 4 MODÈLE ACTUEL DE LA GESTION DE RÉSIDUS DANS LE PORT DE MONTRÉAL.....	13
4.1 Types de résidus	13
4.1.1 Eaux de cale huileuses.....	13
4.1.2 Résidus huileux (« sludge »)	13

4.1.3	Eaux usées	13
4.1.4	Plastique	13
4.1.5	Compostage	14
4.1.6	Déchets domestiques	14
4.1.7	Huile de cuisine	14
4.1.8	Cendres d'incinérateur	14
4.1.9	Déchets opérationnels	14
4.1.10	Résidus de cargaison	15
4.1.11	Déchets dangereux	15
4.2	Déchets internationaux	15
4.2.1	Définition d'un déchet international	15
4.2.2	Dangers des déchets internationaux	15
4.2.3	Précautions particulières concernant les déchets internationaux	16
4.2.4	DI au port de Montréal	16
4.3	Types et quantité de navires	16
4.4	Processus logistique actuel des résidus dans les terminaux	17
4.4.1	Vision globale du processus	17
4.4.2	Processus détaillés	18
4.4.3	Rôle des différents agents chez Urgence Marine	21
4.5	Analyse critique du processus actuel	22
CHAPITRE 5 PROPOSITION ET ÉVALUATION DE SOLUTIONS D'AMÉLIORATION.....		24
5.1	Processus proposé	24
5.1.1	Génération	24
5.1.2	Déchargement.....	24

5.1.3	Déplacement du quai au conteneur principal du terminal	25
5.1.4	Entreposage dans le conteneur principal	26
5.1.5	Collecte et traitement	27
5.2	Modèle de simulation	27
5.2.1	Généralités du modèle	27
5.2.2	Scénarios	29
5.2.3	Stratégie 1	30
5.2.4	Stratégie 2	31
5.2.5	Stratégie 3	33
5.3	Vérification du modèle	35
5.4	Expériences	36
5.5	Analyse de convergence	36
5.5.1	Stratégie 1	37
5.5.2	Stratégie 2	40
5.5.3	Stratégie 3	42
5.5.4	Synthèse de la première série d'expériences	45
5.6	Analyse de sensibilité	45
5.6.1	Augmentation du taux d'arrivées des navires	45
5.6.2	Augmentation du volume des déchets	49
5.6.3	Synthèse de la deuxième série d'expériences	51
5.7	Étude du déploiement des stratégies	52
5.7.1	Stratégie 4	52
5.7.2	Stratégie 5	55
5.7.3	Stratégie 6	57

5.7.4	Stratégie 7	59
5.7.5	Synthèse de la troisième série d'expériences	61
CHAPITRE 6 RÉSULTATS ET DISCUSSION		63
CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....		65
BIBLIOGRAPHIE		67
ANNEXES		70

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1: Données mises à disposition pour les partenaires	12
Tableau 4.1: Types de déchets selon ‘Urgence Marine Inc.’	20
Tableau 5.1: Augmentation du taux d’arrivée stratégie 1 scénario 1	46
Tableau 5.2: Augmentation du taux d’arrivées stratégie 2 - scénario 1	48
Tableau 5.3: Augmentation du taux d’arrivées stratégie 3 - scénario 1	49
Tableau 5.4: Augmentation du volume de déchets stratégie 1 scénario 1	50
Tableau 5.5: Augmentation du volume de déchets stratégie 2 - scénario 1	50
Tableau 5.6: Augmentation du volume de déchets stratégie 3 - scénario 1	51
Tableau 6.1: Synthèse des résultats	63
Tableau A.1: Estimation de la génération des déchets	70
Tableau B.1: Résultats modèle de simulation	71
Tableau B.1: Résultats modèle de simulation (suite et fin).....	72

LISTE DES FIGURES

Figure 4.1: Diagramme simplifié du processus.....	17
Figure 4.2: Flux détaillé des déchets	18
Figure 4.3: Déchargement direct sur le camion de collecte	19
Figure 4.4: Triage de métal	20
Figure 5.1: Déchargement de déchets au quai avec une grue [28].....	25
Figure 5.2: Exemple de conteneur à roues [29]	26
Figure 5.3: Exemple de conteneur pour entreposage de déchets [30].....	26
Figure 5.4: Processus de décision des agents dans la stratégie 1	30
Figure 5.5: Processus de décision des agents dans la stratégie 2	33
Figure 5.6: Processus de décision des agents dans la stratégie 3	34
Figure 5.7: Nombre de navires par semaine par répétition	35
Figure 5.8: Quantité de déchets générée dans une semaine de simulation.	35
Figure 5.9: Distance parcourue par le camion dans la stratégie 1	37
Figure 5.10: Distance parcourue par le distributeur dans la stratégie 1	37
Figure 5.11: Taux d'utilisation du camion dans la stratégie 1	38
Figure 5.12: Distance parcourue par le camion dans la stratégie 1 (moyenne cumulée)	38
Figure 5.13: Distance parcourue par le distributeur dans la stratégie 1 (moyenne cumulée)	39
Figure 5.14: Taux d'utilisation du camion dans la stratégie 1 (moyenne cumulée)	39
Figure 5.15: Distance parcourue par le camion dans la stratégie 2.....	40
Figure 5.16: Taux d'utilisation du camion dans la stratégie 2	41
Figure 5.17: Distance parcourue par le camion dans la stratégie 2 (moyenne cumulée)	41
Figure 5.18: Taux d'utilisation du camion dans la stratégie 2 (moyenne mobile).....	42

Figure 5.19: Distance parcourue par le camion dans la stratégie 3	43
Figure 5.20: Taux d'utilisation du camion dans la stratégie 3	43
Figure 5.21: Distance parcourue par le camion dans la stratégie 3 (moyenne mobile)	44
Figure 5.22: Taux d'utilisation du camion dans la stratégie 3 (moyenne mobile).....	44
Figure 5.23: Taux d'utilisation du camion en fonction du taux d'arrivées	47
Figure 5.24: Distance parcourue du camion en fonction du taux d'arrivées.....	47
Figure 5.25: Distance parcourue du camion en fonction à l'augmentation du taux d'arrivées.....	49
Figure 5.26: Distance parcourue par le camion dans la stratégie 4.....	53
Figure 5.27: Taux d'utilisation du camion dans la stratégie 4	53
Figure 5.28: Distance parcourue par le camion dans la stratégie 4 (moyenne cumulée)	54
Figure 5.29: Taux d'utilisation du camion dans la stratégie 4 (moyenne cumulée)	54
Figure 5.30: Distance parcourue par le camion dans la stratégie 5	55
Figure 5.31: Taux d'utilisation du camion dans la stratégie 5	55
Figure 5.32: Distance parcourue par le camion dans la stratégie 5 (moyenne cumulée)	56
Figure 5.33: Taux d'utilisation du camion dans la stratégie 5 (moyenne cumulée)	56
Figure 5.34: Distance parcourue par le camion dans la stratégie 6.....	57
Figure 5.35: Taux d'utilisation du camion dans la stratégie 6	57
Figure 5.36: Distance parcourue par le camion dans la stratégie 6 (moyenne cumulée)	58
Figure 5.37: Taux d'utilisation du camion dans la stratégie 6 (moyenne cumulée)	58
Figure 5.38: Distance parcourue par le camion dans la stratégie 7	59
Figure 5.39: Taux d'utilisation du camion dans la stratégie 7	59
Figure 5.40: Distance parcourue par le camion dans la stratégie 7 (moyenne cumulée)	60
Figure 5.41: Taux d'utilisation du camion dans la stratégie 7 (moyenne cumulée)	60
Figure 5.42: Taux d'utilisation du camion dans les stratégies 1, 2, 4 et 6	61

Figure 5.43: Taux d'utilisation du camion dans les stratégies 1, 3, 5 et 7	61
--	----

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

CSL	Canada Steamship Lines
DI	Déchets internationaux
GMR	Gestion des matières résiduelles
TMQ	Technopole maritime de Québec
MR	Matières résiduelles
OMI	Organisation Maritime Internationale
ONG	Organisation non gouvernemental
EMSA	European Maritime Safety Agency
ESPO	European Sea Ports Organisation
PRF	Port reception facilities

LISTE DES ANNEXES

Annexe A – Estimation de la génération des déchets [31].....	70
Annexe B – Résultats modèle de simulation.....	71

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous aborderons dans un premier temps la problématique des déchets dans le monde. À travers différentes études, nous montrons quels sont les défis, les problèmes et certaines solutions possibles. Après cela, nous évoquons le problème spécifique des déchets maritimes et introduisons le projet.

1.1 Quoi faire avec les déchets

Une étude réalisée par un groupe de chercheurs en économie écologique de l'Université de Mar del Plata, en Argentine, analyse le risque associé à la croissance disproportionnée du volume de déchets sur la planète (Grupo de Investigación de Economía Ecológica, 2016). Les professionnels affirment que les déchets sont ainsi considérés comme étant l'un des problèmes environnementaux les plus importants de notre société parce que la population et la consommation par habitant augmentent, mais que l'espace pour s'en débarrasser n'augmente pas.

Dans le même ordre d'idées, l'organisation Planeta.org (Planética, 2018), qui traite des questions d'écologie et d'environnement, affirme que les déchets sont un problème sérieux pour les grandes villes et pour la population mondiale en raison de différents facteurs. Entre autres, ils mentionnent la surpopulation des pays, les activités humaines modernes et le consumérisme croissant. La situation est d'autant plus compliquée dans les pays qui n'ont pas la technologie nécessaire pour recycler leurs déchets, et qui polluent l'environnement en les brûlant à ciel ouvert ou en les jetant dans des endroits interdits, ce qui cause entre autres des maladies pour les populations voisines et pollue l'environnement.

Pour faire face à ce problème global, *Greenpeace* parle du concept de "zéro déchet" (Greenpeace Argentina, 2019) comme étant né au début des années 80 de la réflexion d'un petit groupe de spécialistes du recyclage ayant commencé à parler de l'idée de "recyclage total".

Une des premières politiques formelles a été créée en 1995, lorsque Canberra, Australie, a mis en avant l'objectif "Zéro déchets en 2010". Cette politique comprend le recyclage, mais va aussi au-delà en proposant une approche globale de gestion du vaste flux de ressources et de gaspillage de la société humaine. Ce concept consiste à repenser la façon dont nous gérons les déchets, en adoptant une approche où tout peut être et doit être revalorisé.

1.2 Déchets maritimes et dans les ports

Un autre problème majeur en matière de déchets concerne les ports du monde entier et les cours d'eau de la planète, où des milliers de navires naviguent chaque année avec des chargements de déchets potentiellement dangereux s'ils ne sont pas traités correctement et soumis à la réglementation internationale.

Ainsi, selon le journal argentin "La Nación" (Galli, 2013), une croisière de trois mille passagers est équivalente en ce qui concerne la production de déchets, à deux bâtiments d'environ 50 étages. L'Organisation Maritime Internationale (OMI) considère que les navires de commerce (principalement des bateaux de pêche) sont responsables de 15 et 35 % des déchets des eaux de la planète (IMO, 2018).

La disponibilité d'équipements adéquats dans les ports et les incitations financières pour les entreprises jouent également un rôle important dans ce domaine. Isabelle Ryckbost, secrétaire générale de l'Organisation Européenne des ports Maritimes (ESPO, European Sea Ports Organisation), a déclaré que:

“We recognise that better enforcement is not the only way to reduce the waste discharged at sea. Providing the right incentives is equally important. The fee system introduced by the current Directive whereby ships are paying a fixed minimum fee when calling at a port, whether they are delivering waste or not, has worked. It has contributed to the delivery of increased quantities of waste on shore.”

L'impact potentiel de déchets mal traités peut aller de la pollution chimique, qui affecte l'acidité des océans, à la contamination de la chaîne alimentaire, affectant ainsi la vie humaine et marine. Enfin, l'OMI mentionnée ci-dessus a demandé, il y a plusieurs années, que les ports maritimes mettent en place des installations de réception adéquates et a affirmé que la politique de tolérance zéro concernant les déchargements illégaux des navires ne peut être appliquée efficacement sans installations de collecte de déchets dans les ports. Pour cette raison, l'institution a encouragé la mise en place de ces installations pour les déchets générés lors du fonctionnement normal des navires.

1.3 Gestion des matières résiduelles dans les ports maritimes

La gestion des matières résiduelles (GMR) dans les ports maritimes commerciaux est un défi, tant au niveau des processus de gestion (ex., triage dans les bateaux peu efficaces, interactions avec les

opérations des navires, organisation physique des flux, beaucoup de catégories de matières résiduelles, absence de services intégrés multi-matières, pas de standardisation internationale des processus, manque d'entreprises certifiées pour la collecte, pas de débouchés pour certaines matières), qu'au niveau de l'organisation du réseau logistique (ex., coordination des acteurs multiples, autonomie des acteurs, pas de solution collective), qu'au niveau de la variabilité des flux de matières (ex., connaissances limitées sur la qualité et quantité des matières résiduelles, petits volumes, matières dangereuses pas identifiées, saisonnalité des flux). Sur le terrain, ces défis mènent à des coûts importants de GMR, des taux de valorisation faibles des matières résiduelles, et, ultimement, à un impact environnemental négatif associé à l'enfouissement de ces matières.

L'objectif de ce projet est de réaliser une étude préliminaire des opportunités d'amélioration de la gestion des matières résiduelles solides en provenance des bateaux commerciaux au niveau des terminaux du port de Montréal. Ce projet a été réalisé avec des partenaires industriels couvrant plusieurs acteurs de la chaîne logistique inverse, de la génération des résidus, à la collecte de ces derniers (armateurs, opérateurs de terminal, prestataires de service de récupération, administration du port).

L'étude s'est concentrée sur les matières résiduelles domestiques (résidus organiques, matières recyclables et résidus solides) qui sont à ce jour les matières résiduelles les moins bien gérées au niveau portuaire. Sachant que l'objectif de l'étude est de mieux comprendre l'interface entre les navires et les terminaux, seules les MR générées par les navires seront considérées. D'autres sources de MR (résidus de cargaison, résidus huileux, bois de fardage, eaux usées) seront simplement mentionnées dans la présente étude.

L'ensemble des participants sont conscients de l'importance d'intégrer les déchets internationaux à cette étude, afin de développer des outils et des solutions communes et valides pour l'ensemble des navires (autant pour les navires domestiques que les navires océaniques). La volonté des membres du réseau MeRLIN (coordonnateur du projet) est de faire du Port de Montréal un banc d'essai pour ce premier volet et d'appliquer des solutions pertinentes lors d'un projet pilote.

Ce projet préliminaire peut ainsi être comparé à un projet d'amélioration continue dans les organisations, typique dans le domaine du génie industriel. Ce projet est innovant dans la mesure où aucune étude similaire n'a été réalisée dans le Port de Montréal. En particulier, comme il sera expliqué plus loin dans ce mémoire, cette étude préliminaire analyse différents scénarios

d'utilisation de capteurs de charge (poids) permettant d'informer automatiquement les acteurs des quantités de résidus générés, facilitant ainsi les processus de gestion en permettant non seulement la coordination des routes de collecte, mais aussi la facturation des navires pour les services de collecte.

Bien que plusieurs ports commerciaux, notamment en Europe, ont adopté des incitatifs et des procédures efficaces de gestion des matières résiduelles afin de réduire l'impact environnemental de l'industrie du transport maritime, les ports commerciaux aux États-Unis et Canada sont, de façon générale, en retard de ce point de vue. Cette étude préliminaire a ainsi pour but d'initier la démarche d'amélioration continue de la GMR au sein du réseau de partenaires (MeRLIN) directement impliqué dans ces processus. Le projet est donc novateur pour le port de Montréal. C'est aussi une opportunité d'associer les efforts et la volonté des partenaires industriels du projet avec les expertises académiques locales en amélioration continue, gestion maritime et développement durable.

Une contribution supplémentaire de ce projet préliminaire concerne l'identification de projets potentiels d'amélioration à long terme tels que la mise en place d'incitatifs, via une tarification variable, pour promouvoir la standardisation du triage dans les bateaux, la mise en place de procédures de déclaration des MR dans les bateaux, la mutualisation de la revalorisation des MR entre les terminaux, l'optimisation de la sélection des options de valorisation des matières résiduelles ou la mise en œuvre d'une plateforme de partage d'information pour supporter la coordination des acteurs impliqués dans la prise en charge des matières résiduelles.

CHAPITRE 2 REVUE LITTÉRATURE

Il existe beaucoup de littérature sur la collecte de déchets dans les villes, surtout dans le contexte d'assignation de véhicules et de définition de routes. Par contre, la littérature n'est pas aussi abondante dans le secteur portuaire, plus spécifiquement sur la collecte de résidus dans les terminaux. Les informations identifiées dans ce mémoire reposent donc sur deux aspects importants : la manière dont les ports collectent les déchets dans divers pays et le niveau de technologie associé à ce processus.

2.1 Stratégies de collecte des déchets dans le monde

Il existe différentes manières de collecter et de revaloriser les déchets dans le monde. De plus, et selon le pays, il existe différents degrés d'engagement dans cette revalorisation et dans la protection de l'environnement qui en découle.

Par exemple, selon le journal dominicain « El Día » (Bonilla, 2019), dans ce pays, seulement le 2 % des 120 millions de plastiques produits chaque année sont recyclés. Au contraire, d'autres pays comme la Suède ont une capacité de recyclage qui est si importante qu'ils importent des déchets afin de les recycler, et, pour la Suède, moins de 1 % des déchets générés par les citoyens ont été envoyés aux sites d'enfouissement (Sheffield, 2016).

Pour réaliser cette revalorisation (que ce soit 2 % ou 99 % du total des déchets), un processus logistique de collecte est nécessaire. Ce processus est très étudié dans le monde entier, généralement sous le concept de « vehicle routing problem ». Comme expliqué dans son article, Byung-In Kim (Kim, Kim, & Surya, 2005) cherche à développer un algorithme d'insertion pour optimiser l'itinéraire des véhicules utilisés pour la collecte, dans ce cas avec des fenêtres de temps, plusieurs sites de déchargement et une pause déjeuner pour les chauffeurs.

Suivant le même objectif, Michel Gendreau (Gendreau, Guertin, Potvin, & Taillard, 1999) propose un algorithme de recherche tabou en parallèle pour la définition de chemins en temps réel. Dans ce travail, il n'est pas nécessaire de disposer des informations de la demande avant de construire la route de collecte. Cette dernière est ajustée dynamiquement en fonction des modifications apportées en temps réel.

Ces applications mentionnées ci-dessus pourraient être utilisées dans le domaine maritime, en ajoutant des restrictions supplémentaires propres à chaque port. Le « vehicle routing problem » dans les villes ressemble en effet à la situation vécue dans les ports.

Dans le secteur maritime, le gros problème est non seulement la quantité de déchets générés dans les installations portuaires du fait de leur exploitation quotidienne, mais également la grande quantité de déchets que les navires apportent et déchargent dans ces installations. Pour résoudre ce problème, Sergio L. Pereira (Pereira, Fontana, Fontana, & Sakurai, 2014) parle de « waste segregation procedures at its generation » aux ports du Brésil. Cette approche est très intéressante du point de vue logistique et économique, car elle résoudrait dès le départ tout le problème de la séparation des déchets après une collecte. Pour ce faire, il propose d'intégrer aux terminaux un centre de stockage temporaire ainsi qu'une station de pesage, à partir de laquelle les déchets sont acheminés directement aux centres de revalorisation (Jaccoud & Magrini, 2014).

Avec des idées similaires, Adriana Yepes (Yepes, 2006) propose l'utilisation de différents types de conteneurs pour effectuer une séparation à la source. Certains sont mobiles et d'autres sont fixes. Elle propose également l'utilisation de conteneurs de couleurs spécifiques par type de déchets. Pour la collecte des déchets, il existe un camion avec un système de conteneur interchangeable. Dans le même port, où se trouvent les conteneurs pleins, des travailleurs sont chargés de classer les déchets contenus dans ceux-ci et, en même temps, vident ces conteneurs pour les préparer pour la prochaine décharge de bateau. Très proche de cet endroit, à l'intérieur du terminal, le recyclage est effectué à la source. En plus, un incinérateur est utilisé spécifiquement pour ces déchets. Il s'agit d'une machine multichambres à usage intensif, dont le fonctionnement repose sur le principe d'air contrôlé, conçu pour l'incinération industrielle des déchets.

Au Groenland, les autorités ont élaboré un plan décrivant les obligations que les opérateurs de terminaux et les capitaines de navire doivent respecter pour la réception et la livraison des déchets, ainsi que des procédures à suivre pour garantir un entreposage et une gestion corrects des déchets dans les ports. Les installations ont été conçues pour recevoir des quantités relativement faibles de déchets. Pour les grandes quantités de déchets ou de déchets résiduels, une entreprise de collecte des déchets doit être contactée afin que les déchets puissent être éliminés immédiatement après le passage du navire dans un port donné (Gaustad, 2012).

D'autre part, en Allemagne, les autorités ont conçu le « Port Feeder Barge », un nouveau type de navire de port. Ce dernier peut être utilisé pour les opérations de gestion des déchets dans le port. D'autres ports peuvent aussi profiter de l'exploitation de ce type de navire innovant, en améliorant l'efficacité logistique et, en même temps, en réduisant l'empreinte écologique de la logistique de conteneurs intraportuaire. Il peut même faciliter la manutention des conteneurs dans des endroits qui ne sont pas encore adaptés à leur utilisation, que ce soit pour des raisons de faible profondeur ou d'équipement de manutention insuffisant (Weintrit & Neumann, 2013). Cela, combiné à la numérisation et à l'automatisation du suivi des conteneurs de la logistique maritime, expliqué par Angela Gadaev et M. Fruth (Gadaev, 2018) (Fruth, 2017), peut permettre de générer un système potentiellement très efficace pour la gestion des déchets dans les ports.

De la même manière, en Grèce, une grande partie des déchets maritimes sont actuellement placés dans des sacs et sur des palettes ou dans des bacs qui sont ensuite vidés par une compagnie de collecte. Cela fonctionne grâce à un système de contrats qui consiste en des visites régulières des navires. Il existe diverses conditions contractuelles, notamment le volume et le type de déchets, la fréquence d'utilisation des installations et le paiement des frais (Beza, 2014).

2.2 Utilisation de la technologie dans la collecte des déchets

Nous nous intéressons également, dans cette analyse de la littérature, à l'utilisation de la technologie de type capteurs de charge (poids) dans la collecte des déchets. Cet aspect joue en effet un rôle important dans cette étude. Nous analyserons d'abord l'utilisation de la technologie dans différents secteurs, puis enfin dans le secteur maritime. Une attention particulière aux capteurs est donnée.

Dans son étude, Weihong Ma (Weihong, Jinwei, & ZhaoHuarui, 2019) explique l'utilisation de capteurs dans la croissance des porcs. L'auteur dit qu'une alimentation adéquate des porcs peut augmenter la taille de la portée et améliorer le niveau de résistance à la maladie. Au cours des dernières années, des équipements intelligents et automatiques permettant de collecter les durées d'alimentation, l'ingestion, la durée d'alimentation et les conditions de croissance ont été appliquées à l'alimentation des porcs. Pour améliorer la productivité des porcs et améliorer la gestion intelligente des porcs, un réseau de capteurs sans fil, des capteurs intelligents, une plate-forme de service en réseau et système de prise de décisions ont été utilisés dans la gestion des porcs dans de

nombreuses régions en Chine. Les informations sur le cadre de vie, la forme physique et le poids des porcs dans toute la Chine ont été collectées sur la plate-forme de service en réseau à l'aide d'un équipement d'alimentation intelligent doté de plusieurs capteurs.

Avec une utilisation très différente, Akpa A.H. (Elder, Hirohiko, Yutaka, & Keiichi, 2016) explique comment ils ont utilisé des capteurs pour améliorer l'apport alimentaire des gens. Il a proposé un système qui utilise des ustensiles alimentaires, tels que des cuillères ou fourchettes, pour estimer le poids d'un aliment à partir d'une image afin d'estimer la teneur en calories de cet aliment, et ainsi évaluer l'alimentation des personnes et promouvoir la prévention de l'obésité. Le système exige que l'utilisateur ne prenne qu'une seule image du haut avec l'ustensile dans l'image. À l'aide de plusieurs capteurs, le système estime automatiquement le diamètre et la hauteur du récipient pour aliments et en déduit le volume. Ensuite, en fonction du type d'aliment, le système combine les informations pour fournir le poids de l'aliment dans l'image.

En abordant des applications plus spécifiques au secteur maritime, Goran Radoičić (Goran, Miomir, & Miodrag, 2016) explique dans son article comment il a réussi à effectuer une pesée continue dans les camions. Il propose un système alternatif pour le pesage en continu des véhicules lors de la collecte des déchets en mouvement, à savoir un système de pesage embarqué. À l'aide de capteurs, un système de mesure a été mis en place, capable de déterminer le poids des cargaisons individuelles chargées dans le camion, ainsi que de mesurer et de contrôler en parallèle le poids brut du véhicule en mouvement.

De la même manière, en se concentrant sur des contrôles du conteneur (au lieu du camion), Satish, Bukkapatnam and Komanduri (Komanduri & Satish, 2007) étudient la sensibilité aux vibrations de conteneurs sous forme de signaux émis par les étiquettes de capteurs sans fil, et cela vis-à-vis de facteurs définissant les conditions de fonctionnement du conteneur: type de terrain, vitesse du véhicule, dimensions et poids des éléments du conteneur. Des relations quantitatives sont établies entre les modèles de vibrations et les facteurs saillants grâce à une série d'expériences impliquant l'utilisation d'un modèle à l'échelle d'un camion porte-conteneurs et d'un capteur sans fil qui capture les vibrations à des fréquences d'échantillonnage de 200Hz. Cela permet d'identifier les conditions d'opération d'un conteneur en tout temps. Ceci peut aussi être complété par l'étude de Changtai Yu (Yu, 2002), qui se concentre sur le contrôle de l'état interne d'un conteneur au lieu de ses conditions externes.

D'autre part, aux États-Unis, au Japon et à Porto Rico, la technologie du plasma est utilisée pour le traitement des déchets solides, obtenant des résultats très encourageants. Il s'agit d'une technologie de traitement des déchets avec récupération d'énergie qui consiste à dissocier les déchets en leurs éléments de base afin de les utiliser dans d'autres processus de production (Taboada-González, 2009).

Enfin, il existe diverses technologies liées à la capture et à l'utilisation de biogaz provenant des sites d'enfouissement dans des villes comme Buenos Aires, Santiago du Chili, Sao Paulo et Monterrey, entre autres. Cela est notamment utilisé pour réintroduire l'énergie récupérée dans le circuit de la logistique maritime et aider à réduire davantage les coûts et faire des économies d'énergie (Banco Interamericano de Desarrollo, 2018).

Dans le contexte de ce projet, les applications technologiques basées sur les capteurs de charge sur les camions et sur les conteneurs seront considérées.

Dans la section suivante, nous décrivons la méthodologie générale qui a permis de mener à bien cette étude.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

Afin de réaliser cette étude, plusieurs étapes méthodologiques ont été mises en œuvre. Nous expliquons ici le processus suivi pour la préparation de cette étude et sa réalisation. Tout d'abord, nous détaillons les étapes méthodologiques, puis nous introduisons rapidement les partenaires qui ont accompagné ce projet ainsi que leur aide.

3.1 Étapes méthodologiques

Les grandes étapes méthodologiques sont les suivantes.

1. Étude bibliographique de la GMR dans les ports maritimes commerciaux;
2. Collecte d'information sur l'état actuel du terminal : cartographie des processus de GMR pour le déchargement des bateaux (terminal maritime), jusqu'à la revalorisation / recyclage / enfouissement. Cet aspect a été réalisé avec la collaboration d'Urgence Marine, prestataire de service de collecte de déchets;
 - Obtention des informations compilées des volumes récupérés par Urgence Marine;
 - Caractérisation et cartographie des flux physiques de matières résiduelles et les ressources humaines et matérielles utilisées;
3. Analyse de l'état actuel :
 - Analyse des informations collectées;
 - Identification de pistes de solutions ;
4. Proposition et évaluation de solutions :
 - Identification et évaluation du potentiel de modes alternatifs de collecte, manutention et entreposage des MR ;
 - Recommandations d'un nouveau processus de gestion des MR.

La première étape de l'étude bibliographique a permis de faire un état de l'art des approches de GMR dans les ports commerciaux dans le monde. Différentes variantes du processus de collecte et de valorisation des déchets dans les ports ont servi de base à la présente étude pour proposer des améliorations.

Concernant la deuxième étape, elle a été nécessaire, car elle a permis l'observation des processus et des tâches effectués dans les terminaux, ainsi que les échanges d'informations nécessaires pour

pouvoir effectuer le recyclage/enfouissement/revalorisation des déchets. En plus, les résultats de cette collecte d'information, et notamment les cartographies des flux de matières résiduelles et des processus de gestion de ces dernières, ont servi à leur analyse et leur éventuelle amélioration.

Dans la troisième étape, une analyse globale des points critiques du système a été réalisée. En ce qui concerne le GMR, les problèmes les plus importants ont été identifiés pour pouvoir ensuite les traiter méthodiquement depuis leur source.

La quatrième étape propose une étude comparative de différentes stratégies où chacune a ses avantages et ses inconvénients. La faisabilité de chacune de ces stratégies est examinée et une analyse de sensibilité a permis d'évaluer la validité et la robustesse du modèle proposé face à des augmentations des volumes et de la fréquence de l'arrivée de déchets en vue d'améliorer la GMR dans le port de Montréal.

3.2 Partenaires

Ce projet bénéficie d'un partenariat avec le Réseau MeRLIN, promu par la Technopole maritime du Québec (TMQ), et dont la mission est de faciliter le réseautage entre les milieux industriels et de la recherche. Cette collaboration a été très appréciée, car ils ont toujours facilité l'échange d'informations, accéléré l'organisation de réunions et permis de mettre en contact les personnes nécessaires au développement du projet.

De plus, le soutien apporté par l'organisation Desgagnés a été important. Ils ont mis leurs navires à disposition afin qu'ils puissent être visités et également ils ont accompagné le chercheur lors des visites des différents terminaux du port de Montréal dans le but d'expliquer les différents processus qui se déroulent.

Pour la collecte d'information, il a fallu aller directement aux terminaux, faire des observations et passer des entrevues avec le personnel du terminal et d'autres partenaires afin d'obtenir et de valider les informations collectées, mais aussi les cartographies qui ont été réalisées. Tout cela a été autorisé et supervisé par la société Urgence Marine, qui a joué un rôle clé en permettant d'accompagner le conducteur du camion de collecte afin d'observer les différents aspects de ce processus. Finalement, on présente un tableau qui montre les différentes données mises à disposition pour les partenaires :

Tableau 3.1: Données mises à disposition pour les partenaires

CSL / Groupe Desgagnés	<ul style="list-style-type: none"> • Inventaire MR pour chaque navire de sa flotte • Politique, pratiques et procédures internes en GMR • Démarche 'Programme de reconnaissance ICI ON RECYCLE !'
Urgence Marine	<ul style="list-style-type: none"> • Inventaire des MR et volumes générés par client • Procédures dédiées aux déchets internationaux • Information de collecte des MR
Port de Montréal	<ul style="list-style-type: none"> • Information concernant le trafic, les différents types de navires, le nombre d'équipages par navire • Capacité des passagers des différents navires

Dans le chapitre suivant, nous abordons plus en détail le processus logistique de la collecte dans le port de Montréal.

CHAPITRE 4 MODÈLE ACTUEL DE LA GESTION DES RÉSIDUS DANS LE PORT DE MONTRÉAL

Dans ce chapitre, nous discuterons de la situation actuelle dans le port de Montréal. Nous mentionnerons les types de déchets générés, les types de navires qui arrivent et enfin les étapes suivies aujourd'hui pour le traitement de ces déchets.

4.1 Types de résidus

En général, les déchets générés dans le secteur portuaire ressemblent beaucoup à ceux que l'on peut trouver dans une résidence. Cependant, certains déchets sont spécifiques à cette industrie.

Il existe différentes classifications acceptées pour différencier les déchets maritimes, mais celle choisie pour ce mémoire est élaborée par CE Delft (CE Delft, 2017).

4.1.1 Eaux de cale huileuses

L'eau de cale est un mélange de liquides recueillis dans la cale d'un navire. Elle est composée d'un mélange d'eau douce, d'eau de mer, d'huile, de « sludge », de produits chimiques et de divers autres fluides s'écoulant dans la cale.

4.1.2 Résidus huileux (« sludge »)

Les résidus huileux (« sludge ») sont les déchets provenant de la purification du carburant, de l'huile de graissage ou des huiles usées séparées des séparateurs eau-huile, des équipements de filtration d'huile, etc.

4.1.3 Eaux usées

Les eaux usées sont définies comme le drainage provenant de toute forme de toilettes et d'urinoirs, des lavabos, drainage des espaces contenant des animaux vivants, etc. On parle généralement d'eau noire.

4.1.4 Plastique

Les déchets plastiques peuvent être générés dans tous les types de navires et proviennent souvent de provisions et de fournitures utilisées pour les opérations à bord du navire. Les déchets plastiques

comprennent généralement des feuilles, des emballages, des bouteilles, des cordes synthétiques, des filets de pêche synthétiques, des sacs à ordures en plastique et des bidons de produits chimiques vides.

4.1.5 Compostage

L'OMI définit cela comme toute substance alimentaire gâtée ou intacte et inclut les fruits, les légumes, les produits laitiers, la volaille, la viande et les restes de nourriture générés à bord du navire. Tout ce qui est considéré comme organique peut être jeté à l'eau à partir d'une certaine distance de la côte.

4.1.6 Déchets domestiques

Les déchets domestiques sont tous les déchets des espaces domestiques à bord du navire qui ne sont pas des déchets alimentaires, de l'huile de cuisine ou du plastique. L'OMI définit cela comme « tous les types de déchets non couverts par d'autres annexes qui sont générés dans les espaces de logement à bord du navire ». Par conséquent, les déchets domestiques sont généralement constitués de papier, de carton, de lampes fluorescentes, de matériaux synthétiques, de feuilles métalliques, de canettes métalliques, de couvercles, de verre, de déchets d'emballages, etc.

4.1.7 Huile de cuisine

L'huile de cuisine est générée à bord du navire lors de la préparation des aliments et sont générés sur la plupart des types de navires.

4.1.8 Cendres d'incinérateur

Les navires peuvent être équipés d'incinérateurs pour brûler les « sludges », les déchets domestiques, les déchets d'opération et d'autres types de déchets. Les cendres de l'incinérateur qui en résultent sont consignées séparément dans le registre des déchets.

4.1.9 Déchets opérationnels

La plupart des navires incluent les déchets de la salle des machines dans cette catégorie, tel que les chiffons huileux et les batteries, mais peuvent également inclure d'autres déchets résultants de

l'exploitation du navire, tel que les vieux câbles, du bois, des machines à laver, des réfrigérateurs, des aérosols, des échelles, des feux d'artifice, des restes de produits chimiques et de peinture.

4.1.10 Résidus de cargaison

L'Annexe V de MARPOL définit les résidus de cargaison comme les « restes de toute cargaison qui reste sur le pont ou dans les cales après le chargement ou le déchargement ».

4.1.11 Déchets dangereux

L'Annexe VI de MARPOL définit les déchets dangereux (substances qui appauvrissent la couche d'ozone) comme par exemple les halons 1211, 1301, 2402, CFC-11, CFC-12, CFC-113, CFC-114 et CFC-115. Ces substances sont utilisées à bord des navires dans les appareils de climatisation ou les équipements de refroidissement.

4.2 Déchets internationaux

Les déchets internationaux jouent un rôle important dans la chaîne logistique maritime. Cette section (basée sur les définitions de l'agence canadienne d'inspection des aliments (Allain, 2007)) est dédiée à son explication.

4.2.1 Définition d'un déchet international

On entend par déchets internationaux (DI) tout ce qui est :

- Rebut de navire (rebut renfermant un produit animal provenant de l'étranger)
- Déchets d'origine animale (fumier, urine, etc.)
- Végétaux et les produits végétaux que transportent les voyageurs internationaux

4.2.2 Dangers des déchets internationaux

En cas de déversement au cours du transport de déchets internationaux, ces matières pourraient être introduites dans l'environnement canadien, ce qui pourrait entraîner, par exemple, les maladies suivantes :

- Virus d'Influenza aviaire H5N1
- Virus de la fièvre aphteuse

- Virus de la peste équine
- Virus de la Maladie de Newcastle
- Virus de la peste porcine africaine
- Virus de la maladie vésiculeuse du porc

4.2.3 Précautions particulières concernant les déchets internationaux

Tous les déchets internationaux doivent être manipulés, transportés, entreposés et éliminés conformément aux règles sur la santé des animaux données par le gouvernement. Les contenants servant à l'entreposage ou au transport des DI doivent donc être nettoyés et désinfectés.

En ce qui concerne ce projet, le fait qu'il y ait des déchets internationaux affecte la logistique, car le gouvernement canadien impose une route spécifique aux camions qui transportent ces types de déchets, afin de respecter certaines normes de sécurité.

De même, le fait qu'il y ait des déchets internationaux affecte le traitement de l'ensemble des déchets, car les déchets internationaux ne peuvent pas être mélangés avec les déchets nationaux (à l'exception de certains cas particuliers). En plus, il est interdit de revaloriser toute matière provenant de l'international, dans le but d'en empêcher sa réintroduction dans l'environnement canadien et minimiser le risque de maladies.

4.2.4 DI au port de Montréal

Les déchets internationaux sont collectés dans chaque terminal et directement acheminés vers son centre de destination finale approprié. Ce dernier est spécifique pour les déchets internationaux. Là, les DI sont enfouis. Étant donné qu'ils ne peuvent pas être mélangés avec les autres types de déchets (sauf dans certains cas particuliers), les DI suivent une procédure différente de celle des autres types de déchets. Selon l'Agence canadienne d'inspection des aliments, les matières provenant de l'étranger n'ont pas le droit d'être revalorisés (il faut absolument les enfouir), afin de s'assurer qu'il n'y ait pas de risque pour la santé animale et phytosanitaire.

4.3 Types et quantité de navires

Grâce aux informations partagées par les autorités du port de Montréal, nous présentons ci-dessous les statistiques de l'année 2017, avec des données agrégées par rapport aux types de navires

débarqués dans les terminaux du port de Montréal au cours de l'année 2017 (Port de Montréal, 2017). Environ 2 500 navires ont débarqué tout au long de l'année, dont 20 % de type pétrolier, 16 % de navires à conteneurs et les 64 % restants répartis entre de nombreux types de navires. Un navire compte en moyenne 30 membres d'équipage, à l'exception des navires de croisière pouvant contenir facilement 3 000 personnes plus les membres d'équipage. Tous ces passagers, avant d'arriver à un terminal du port de Montréal, voyagent depuis un temps pouvant aller d'un jour à plusieurs semaines. Pendant ce temps, les déchets sont accumulés. Cela génère ainsi des tonnes de déchets qui doivent être collectés, triés et traités. Le gouvernement du Canada a réalisé une étude visant à estimer la quantité de déchets générés par navire par jour passé en mer. L'annexe A synthétise les résultats de cette étude.

4.4 Processus logistique actuel des résidus dans les terminaux

Dans cette section, nous expliquons les étapes suivies par les déchets entrants aux terminaux. Pour cela, nous commençons par une explication générale et terminons par une explication plus détaillée.

4.4.1 Vision globale du processus

Comme introduction, la figure suivante montre de manière simplifiée les étapes générales que suivent les déchets.



Figure 4.1: Diagramme simplifié du processus

4.4.1.1 Génération des déchets

Les déchets sont générés à bord des navires, en raison de leur fonctionnement normal, et en conséquence de la présence humaine. Nous observons, en général, des bonnes connaissances des opérateurs de navires, en ce qui concerne la classification des déchets. Les membres de l'équipage connaissent ainsi les règles de gestion des déchets et disposent d'outils et d'équipements appropriés pour assurer une bonne séparation des déchets. Il y a des réunions informatives régulières pour les

membres d'équipage permettant d'expliquer les nouvelles procédures et pour rafraîchir les procédures plus anciennes. Les trois unités d'entreposage utilisées dans les navires pour accumuler les déchets sont les sacs, les conteneurs (« bins ») et les cages.

4.4.1.2 Collecte

Une fois les navires arrivés dans les terminaux, tous les déchets générés sont collectés par un camion et transportés vers un centre d'entreposage d'Urgence Marine.

4.4.1.3 Revalorisation

Les déchets collectés sont ensuite acheminés vers un centre approprié, capable de revaloriser les matières réceptionnées en fonction de leur nature.

4.4.2 Processus détaillés

La figure suivante montre de manière détaillée les étapes suivies par les déchets et donc leur flux. Selon le port ou l'armateur, il y a de petites différences mineures.

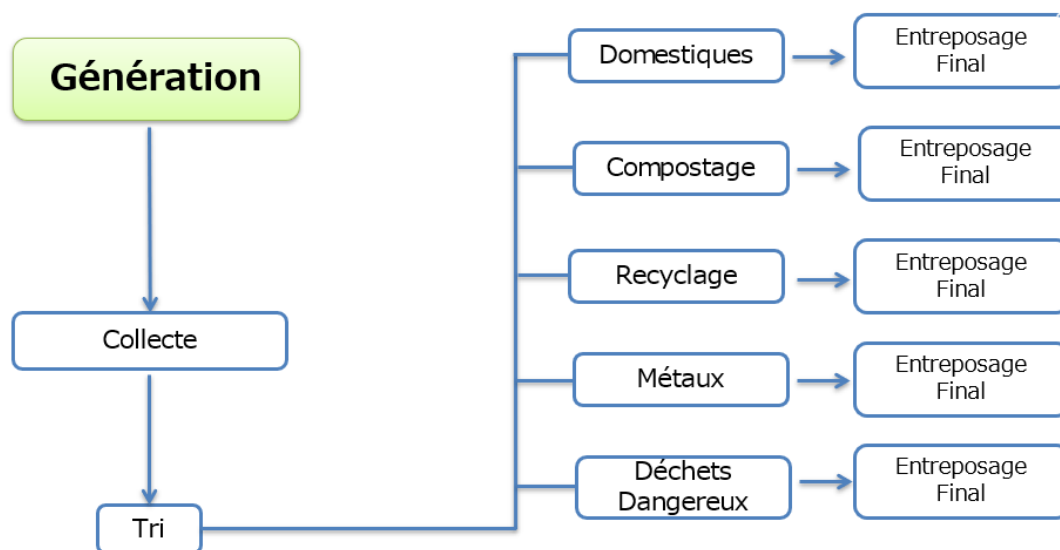


Figure 4.2: Flux détaillé des déchets

4.4.2.1 Génération

Idem 4.4.1.1

4.4.2.2 Déchargement

Une fois que les navires sont arrivés au terminal du port, ils contactent Urgence Marine qui envoie directement le camion collecter ses déchets. Actuellement dans le port de Montréal ce processus est très simple, il consiste simplement à jeter les déchets à la main directement dans le camion de collecte. Tous les déchets sont ramassés de cette manière, et cela pour chaque type présent.



Figure 4.3: Déchargement direct sur le camion de collecte

4.4.2.3 Collecte

Le camion passe par chaque terminal et collecte tous les déchets du navire. Ce processus peut prendre entre 30 minutes et une heure par navire. Plus de détails sur le processus de gestion de la collecte des déchets et de décision du conducteur de camion pour définir son itinéraire sont présentés dans la section 4.4.3. Le type de camion utilisé est souvent de type ‘roll-on roll-off’, mais ce n'est pas le seul utilisé comme le montre la photo précédente où un camion poubelle a été utilisé. L'avantage du type ‘roll-on roll-off’ est qu'il permet de décharger le conteneur une fois rempli et d'en recharger un autre identique, mais vide.

4.4.2.4 Tri

Tous les déchets collectés sont acheminés au centre de triage. Au début de cette étape, on trouve un grand conteneur (celui qui a été amené par le camion de collecte) avec tous les déchets mélangés. Ils sont mélangés, car aucune procédure ne permet de garantir que la séparation effectuée dans le navire est maintenue pendant le chargement des déchets dans le camion. À la fin de cette étape,

tous les déchets sont séparés et classés. Chaque type de déchet a ainsi son propre conteneur exclusif de stockage. Cette unité de stockage commence à se remplir au fur et à mesure que les déchets sont extraits du conteneur principal.

Dans la figure suivante, on peut voir comment le métal est séparé du reste des déchets qui sont plus en arrière et mélangés avec les autres types de déchets.



Figure 4.4: Triage de métal

La classification des déchets effectuée par la compagnie qui fait la collecte n'est pas exactement la même que la classification théorique mentionnée à la section 4.1. Le tableau suivant présente la classification faite par Urgence Marine :

Tableau 4.1: Types de déchets selon 'Urgence Marine Inc.'

Déchets internationaux	Déchets huileux
Déchets domestiques	Huile de cuisson
Recyclage	Fluorescent
Organique	Batteries
E-waste	Restant de peinture

Chaque type de ces déchets a un conteneur de stockage séparé et unique, ainsi qu'un centre de revalorisation et traitement unique. Pour les déchets internationaux, le conteneur a un volume de

40 vg^3 , pour les déchets domestiques est de 20 vg^3 et de 10 vg^3 pour le recyclage. Pour le reste, des tailles différentes sont utilisées selon l'occasion, mais toujours de petits volumes.

4.4.2.5 Centres de revalorisation et traitement

Au fur et à mesure que les déchets sont triés, les conteneurs exclusifs par type de déchet mentionnés ci-dessus se remplissent. Une fois remplis, ils sont envoyés à leur centre de revalorisation et traitement final pour être vidés. Dans chaque centre, les déchets sont revalorisés sauf les déchets domestiques et déchets internationaux qui sont enfouis. Par la suite, les conteneurs sont renvoyés vides au centre de triage et le processus recommence. Chaque type de déchet a un centre différent pour sa revalorisation. La valeur du volume qui déclenche une livraison au centre de revalorisation est celle mentionnée à la Section 4.4.2.4.

4.4.3 Rôle des différents agents chez Urgence Marine

Afin de définir l'itinéraire de la collecte et de s'assurer de l'équilibre entre les montants facturés et les volumes de déchets reçus, nous expliquons ci-dessous les différentes tâches à exécuter par les différents agents.

4.4.3.1 Agent coordonnateur

Il est chargé de recevoir les appels des armateurs. Ces entreprises informent dans quel terminal le navire arrivera, ainsi que la quantité de déchets à décharger. Toutes ces informations sont écrites sur un billet. L'agent coordonnateur prépare chaque jour les billets pour le lendemain. De cette façon, les différents terminaux qui doivent être visités sont accumulés.

La liste de billets est ensuite donnée au chauffeur tous les jours à 8 heures du matin. Lorsqu'un appel est reçu pour demander une collecte le jour même, le coordinateur appelle le conducteur par téléphone lui indiquant qu'il doit ajouter la collecte de ce navire dans son itinéraire. Dans ce cas, c'est le conducteur qui fait le billet lors de sa visite au navire.

4.4.3.2 Agent chauffeur

Chaque jour, à 8 heures du matin, il récupère les billets accumulés et part pour effectuer son parcours. Selon les navires présents, il rend visite l'un après l'autre en fonction du critère de distance, c'est-à-dire que lorsqu'il finit de récupérer les déchets d'un navire, sa destination suivante

est le navire le plus proche figurant sur sa liste de billets. S'il reçoit un appel du coordinateur pour faire une demande spéciale, il ajoute le bateau à la liste et suit son itinéraire en fonction des critères susmentionnés.

Lorsque la capacité de stockage du camion est pleine ou lorsqu'il n'y a plus de navires à visiter, il retourne à la station de tri pour décharger tous les déchets collectés. Urgence Marine offre ses services de collecte 24 h sur 24 h.

L'estimation du volume reçu n'est pas effectuée par le chauffeur, mais par la personne responsable du triage, qui communique ensuite ces informations à l'agent contrôleur aux fins de facturation.

4.4.3.3 Agent contrôleur

Une fois que tous les déchets récupérés lors de la collecte sont triés, une vérification doit être faite entre les quantités indiquées dans les billets et les quantités effectivement collectées. Ceci est la tâche de l'agent contrôleur et est effectué à chaque fois à la fin de chaque triage. S'il n'y a pas de différence, la facture est ensuite envoyée à l'armateur. En cas de différence, il doit en informer l'armateur et indiquer qu'il a facturé plus que ce qui a été signalé et que cela se reflète sur la facture.

4.5 Analyse critique du processus actuel

Sur la base de ce qui a été décrit jusqu'à présent à la section 4.4, nous proposons ci-dessous une analyse critique rapide dans le but d'identifier les problèmes importants et proposer des améliorations possibles.

Ainsi, le premier symptôme d'inefficacité se produit lorsqu'on constate que le service de collecte doit être disponible 24 heures sur 24. Cela implique que l'agent chauffeur n'est utilisé seulement qu'une fraction de son temps disponible. Nous avons vu dans la littérature existante que ce n'est pas la seule façon de gérer cette ressource.

Le deuxième symptôme est observé lorsque tous les déchets doivent être transportés deux fois sur de longues distances (des terminaux vers le centre de tri et à partir du centre de tri vers les centres de revalorisation/traitement). À cela s'ajoute le fait qu'avant le deuxième transport, un travail important doit être réalisé pour séparer les déchets, qui étaient déjà séparés dans les bateaux (ils se mélangent en les déchargeant des navires).

Enfin, nous constatons aussi que la technologie utilisée pour le déchargement de déchets et l'échange d'informations n'est pas la plus moderne, générant des erreurs ou des inefficacités qui pourraient être évitées.

Compte tenu de tout cela, nous concluons que le processus n'est pas très efficace et qu'il existe des améliorations envisageables qui sont présentées et évaluées dans le chapitre 5.

CHAPITRE 5 PROPOSITION ET ÉVALUATION DE SOLUTIONS D'AMÉLIORATION

Tenant compte de l'analyse critique précédente, nous proposons dans ce chapitre différentes améliorations du processus, ainsi qu'une analyse comparative de différentes stratégies logistiques visant à optimiser l'utilisation des ressources, la réduction des coûts associés à la collecte et l'augmentation de la revalorisation des déchets.

5.1 Processus proposé

En nous basant sur ce qui a été observé dans le port de Montréal et sur ce qui a été lu dans la littérature existante, nous proposons un processus logistique de collecte général, différent de celui actuellement en place, qui offre certains avantages, et qui permet d'implémenter différentes stratégies de collecte.

5.1.1 Génération

Le processus ne concerne que la collecte des déchets. Ainsi, puisque la génération de ces derniers est faite dans les bateaux, cette partie est identique à celle décrite à la section 4.4.2.1.

5.1.2 Déchargement

Concernant le déchargement, au lieu de jeter les déchets directement dans le camion collecteur, les déchets sont déchargés sur le quai où se trouve le navire. Cette étape peut avoir différentes variations selon le type de navire. Le processus peut aller d'un haut degré de technologie, tel qu'une grue pour déplacer les déchets du pont du navire au quai (voir photo ci-dessous), à un processus très simple, qui consiste simplement à jeter les déchets à la main sur le quai.



Figure 5.1: Déchargement de déchets au quai avec une grue (Pxhere, 2017)

5.1.3 Déplacement du quai au conteneur principal du terminal

Dans cette étape, un petit conteneur à roues est utilisé pour faciliter le transport des déchets du quai au conteneur principal, qui a une plus grande capacité de stockage. Ce petit conteneur est utilisé quand il y a une grande distance à parcourir (de l'ordre des dizaines de mètres). Le but est de faciliter le déplacement des déchets. Le volume d'entreposage du petit conteneur (voir photo ci-dessous) peut être de 2 ou 4 vg^3 . Le temps passé dans cette étape est de l'ordre de quelques minutes.

Cette étape serait facultative si le conteneur principal se trouvait à proximité du quai.



Figure 5.2: Exemple de conteneur à roues (Public Domain Pictures, 2019)

5.1.4 Entreposage dans le conteneur principal

Ensuite, il faut mettre les déchets du petit conteneur dans le plus grand conteneur. Ceci est dû à un problème d'espace. Ce dernier a généralement une capacité de stockage de $20 \text{ } vg^3$ et la durée de stockage peut aller de plusieurs heures jusqu'à plusieurs jours. Ici, les déchets vont rester jusqu'à qu'ils soient collectés. Ces conteneurs peuvent posséder plusieurs sections d'entreposage différentes, séparés par une barrière à l'intérieur, ce qui permet de les vider séparément.



Figure 5.3: Exemple de conteneur pour entreposage de déchets (Gaudreau, 2019)

5.1.5 Collecte et traitement

Les différentes stratégies de collecte et traitement sont expliquées et analysées en détail dans la section suivante et constituent le cœur de cette étude.

5.2 Modèle de simulation

Afin de vérifier l'efficacité des solutions proposées, le logiciel Anylogic a été utilisé pour évaluer différentes stratégies selon différents scénarios. Ainsi, un premier modèle de simulation a été créé pour représenter ce qui se passe chaque jour dans le port de Montréal. La différence principale avec la vie réelle est que le modèle de simulation est réalisé à une plus petite échelle, c'est-à-dire que nous allons traiter une plus petite diversité de déchets et un plus petit nombre de terminaux portuaires. De plus, par manque d'informations précises, nous avons dû poser des hypothèses concernant certaines distances.

Afin de minimiser l'impact que cela peut avoir sur la validité des résultats, les déchets ont été regroupés en classes pour fin d'étude. Les volumes totaux de déchets sont donc identiques aux volumes réels. De plus, nous avons aussi regroupé les terminaux du port de Montréal, sans affecter la distance réelle parcourue par le camion. Ainsi, le nombre plus faible de terminaux portuaires n'affecte pas le résultat final puisque la longueur réelle du port de Montréal a été conservée.

5.2.1 Généralités du modèle

Les déchets sont générés dans les terminaux par les navires entrants, collectés avec un camion puis acheminés au centre de revalorisation et de traitement final correspondant à chaque type de déchet. Sept variations différentes (stratégies) de ce processus seront étudiées dans deux scénarios de génération différents. Dans le premier scénario, tous les terminaux ont la même distribution de probabilité de génération de déchets (volume et fréquence). Par contre, dans le deuxième scénario, nous faisons la distinction entre des petits terminaux, des terminaux moyens et des grands terminaux, et cela, sans changer le volume journalier de déchets à traiter. Dans le deuxième scénario, étant donné qu'il existe différents types de terminaux, nous avons simplement utilisé une approximation linéaire au niveau des volumes générés pour que leur somme totale soit égale à la moyenne annuelle générée de chaque type de déchets du scénario 1.

Ensuite, chaque fois qu'un navire arrive, il apporte trois types des déchets, avec de quantités différentes de chaque type. Ces valeurs de production de déchets ont été extraites à partir des vraies données partagées par la compagnie Urgence Marine. L'unité de mesure est donnée en kilogrammes parce que quand les camions de cette compagnie se rendent dans les centres de revalorisation et traitement, ils sont pesés avant le déchargement et les données sont obtenues en kilogrammes.

La distance entre le premier terminal et le dernier terminal est de 10 km. Cela correspond à la région desservie pour le service de collecte de déchets dans le port de Montréal. Le trafic et les conditions de la circulation routière ne sont pas pris en compte, de même que l'entretien ou les réparations du camion.

N'ayant pas pu avoir l'emplacement réel de chaque centre de revalorisation finale, nous les avons répartis au hasard dans un rayon de 7 km autour du port de Montréal. Bien que cette hypothèse ne puisse pas être validée, elle est identique pour chacune des expériences réalisées. Comme les volumes de déchets sont générés aléatoirement dans chaque répétition d'expérience, nous estimons qu'elle ne devrait ainsi pas affecter la performance relative de chaque stratégie.

Puisqu'il s'agit d'une simulation à base d'agents, nous allons trouver les agents suivants :

- Agent déchet (nombre d'agents = 3)
- Agent terminal (nombre d'agents = 15)
- Agent centre de revalorisation et traitement (nombre d'agents = 3)
- Agent camion (nombre d'agents = 1)
- Agent distributeur (nombre d'agents = 1)

L'agent distributeur est chargé de l'envoi des déchets du centre de triage aux centres de revalorisation (réception finale). À chaque itération de chaque simulation, nous mesurerons les 3 indicateurs de performance suivants :

- Distance parcourue par le camion
- Distance parcourue par le distributeur
- Taux d'utilisation du camion

La formule qui définit le taux d'utilisation du camion est :

$$\frac{\text{temps en déplacement} + \text{temps en chargement} + \text{temps en déchargement}}{\text{temps total disponible}}$$

5.2.2 Scénarios

Nous détaillons ci-dessous les paramètres d'entrée de chaque terminal dans les différents scénarios de simulation.

5.2.2.1 Scénario 1

1 semaine de simulation, du 19 novembre 2018 à 8 h 00 au 26 novembre 2018 à 8 h 00

- 15 terminaux avec la même distribution de probabilité de génération de déchets
- Taux d'arrivées par terminal : distribution de Poisson avec une moyenne de 3.2 par semaine
- Quantité de déchets internationaux par arrivée : normal ($\mu = 286$ kg. ; $\sigma = 28.6$ kg.)
- Quantité de déchets nationaux par arrivée : normal ($\mu = 136$ kg. ; $\sigma = 13.6$ kg.)
- Quantité de déchets de recyclage par arrivée : normal ($\mu = 3$ kg. ; $\sigma = 0.3$ kg.)

5.2.2.2 Scénario 2

1 semaine de simulation, du 19 novembre 2018 à 8h00 au 26 novembre 2018 à 8h00

- 2 grands terminaux, 4 terminaux moyens et 9 petits terminaux
- Taux d'arrivées par terminal : Distribution de Poisson avec une moyenne de 3.2 par semaine
- Quantité de déchets internationaux par arrivée :
 - Grand terminal : normal ($\mu = 1109$ kg. ; $\sigma = 110.9$ kg.)
 - Moyen terminal : normal ($\mu = 425$ kg. ; $\sigma = 42.5$ kg.)
 - Petit terminal : normal ($\mu = 41.5$ kg. ; $\sigma = 4.15$ kg.)
- Quantité de déchets nationaux par arrivée :
 - Grand terminal : normal ($\mu = 514$ kg. ; $\sigma = 51.4$ kg.)
 - Moyen terminal : normal ($\mu = 202.5$ kg. ; $\sigma = 20.25$ kg.)
 - Petit terminal : normal ($\mu = 22.5$ kg. ; $\sigma = 2.25$ kg.)
- Quantité de déchets de recyclage par arrivée :
 - Grand terminal : normal ($\mu = 13.8$ kg. ; $\sigma = 1.38$ kg.)
 - Moyen terminal : normal ($\mu = 3$ kg. ; $\sigma = 0.3$ kg.)
 - Petit terminal : normal ($\mu = 0.6$ kg. ; $\sigma = 0.06$ kg.)

5.2.3 Stratégie 1

La stratégie 1 décrit la situation actuelle dans le port de Montréal. Cette stratégie a été programmée pour pouvoir comparer les résultats et faire des recommandations. Le processus de décision des agents se trouve dans la figure suivante.

Le camion part du garage (situé au même endroit que le centre de triage) et se dirige vers le terminal le plus proche qui a des déchets à récupérer. Ici, il s'arrête, ramasse les déchets du navire et se retire. Il se rend ensuite au terminal le plus proche qui a des déchets à récupérer et répète le processus jusqu'à ce que le camion soit plein ou jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de déchets dans aucun terminal portuaire. Dans chaque terminal visité, tous les déchets présents sont collectés (contrairement aux autres stratégies où seulement certaines catégories de déchets sont collectées). Après avoir été collectés, les déchets sont tous mélangés dans le camion, ce qui explique la nécessité de trier.

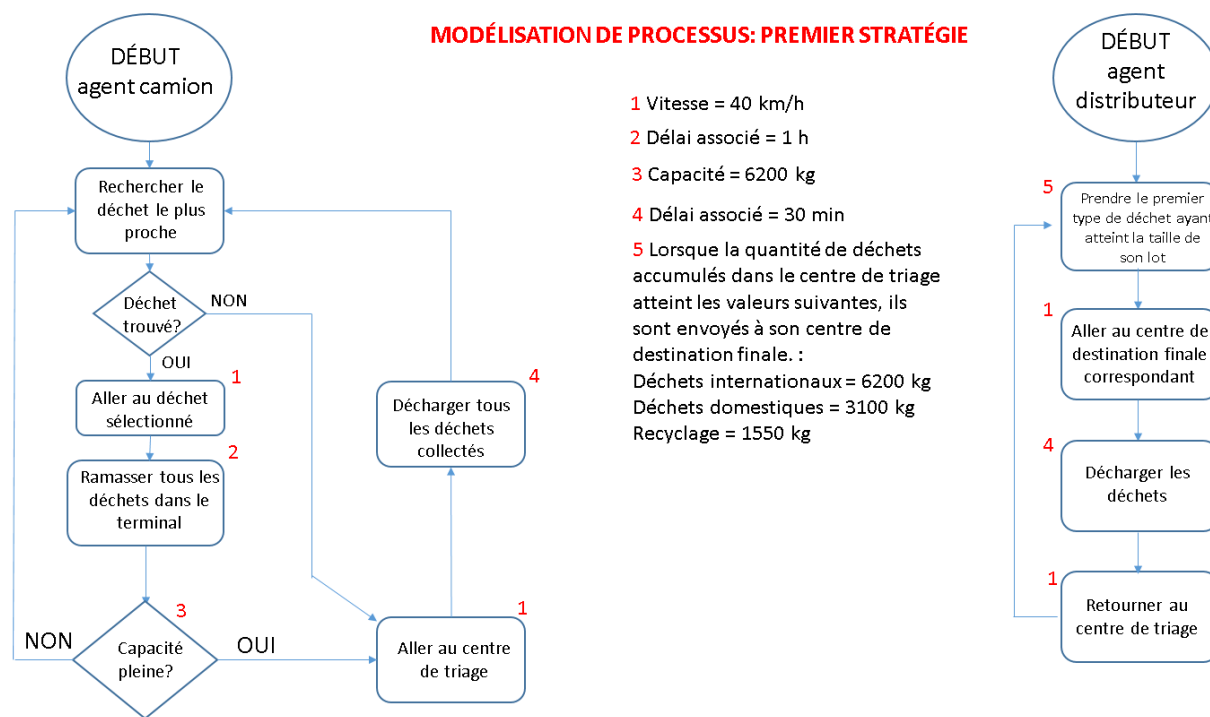


Figure 5.4: Processus de décision des agents dans la stratégie 1

Tous les déchets ramassés sont acheminés vers le centre de triage pour fin de séparation et de classification. Une fois que suffisamment de déchets ont été accumulés dans l'une des catégories, ils sont acheminés par l'agent distributeur vers leur centre de revalorisation (réception finale).

S'ils n'ont pas de déchets à ramasser ou à transporter, le chauffeur du camion et le distributeur sont tous deux en pause et retournent au garage. Tel que mentionné auparavant, la localisation réelle des centres de revalorisation et traitement des déchets a été jugée confidentielle.

5.2.4 Stratégie 2

Dans cette stratégie, une approche de livraison directe des terminaux aux centres de revalorisation et traitement final a été adoptée. Cette stratégie cherche à éviter les coûts de main-d'œuvre liés au triage et opte ainsi pour une séparation à la source, puisque les navires trient déjà leurs déchets. De cette manière, un agent distributeur qui effectue un deuxième transport des déchets n'est plus nécessaire.

Pour mener à bien cette approche, il est nécessaire de suivre le processus expliqué à la section 5.1, où les déchets sont placés dans des conteneurs. Dans le conteneur, on utilise ici des capteurs de charge (poids) sur les conteneurs qui informent en temps réel sur le pourcentage de remplissage du conteneur. Cette information est utile pour permettre la séparation à la source.

Par la suite, nous avons classé tous les déchets en deux catégories, la catégorie « A » et la catégorie « B ». Les déchets de catégorie « A » représentent 80 % du flux des déchets en circulation dans le port de Montréal. Les déchets de la catégorie « B » représentent les 20 % restants.

Nous faisons ici l'hypothèse que tous les déchets de la catégorie « A » ont la même destination finale. Ceci est réalisable puisque ces deux types de déchets sont actuellement enfouis. La seule conséquence est que, ayant un mélange de déchets nationaux et internationaux, l'ensemble est traité comme étant des déchets internationaux.

Les déchets de catégorie « B » ont plusieurs destinations finales différentes, mais, afin de simplifier la simulation, nous n'avons placé qu'un seul déchet dans le groupe « B ». Nous considérons ainsi qu'il y a un seul centre de revalorisation/traitement pour les déchets de ce groupe. Le modèle peut facilement être étendu à plusieurs types de déchets.

Étant donné que le groupe B est constitué de petites quantités de différents déchets et qu'un camion à trois compartiments peut être utilisé pour sa collecte, il n'est pas nécessaire de trier les déchets de ce groupe. Dans les terminaux, le conducteur du camion peut mettre les déchets dans les différents compartiments du camion. Ensuite, à leur arrivée dans chaque centre de revalorisation et traitement, les déchets peuvent facilement être déchargés, car ils sont déjà séparés dans les sections

spécifiques du camion. Urgence Marine compte déjà parmi ses véhicules un camion à trois compartiments.

Ainsi, les conteneurs ont une section spécifique pour chaque catégorie de déchets ; c'est-à-dire qu'il y aura un mur à l'intérieur qui sert à diviser les 2 catégories. Cela permet au camion de prendre les déchets d'une section à la fois. Par conséquent, les déchets ne sont pas mélangés pendant leur manutention. De plus, puisqu'il est nécessaire d'avoir l'information sur le poids de chaque catégorie de déchets, un capteur de charge pour chaque division du conteneur est nécessaire.

En ce qui concerne le processus de définition de l'itinéraire du camion de collecte, le critère qui définit le choix du prochain terminal à visiter est le rapport entre le volume de déchets présent dans le conteneur et la distance entre la position courante du camion et celle du conteneur à vider. C'est-à-dire que le camion visitera en tout temps le terminal avec le conteneur de plus grand rapport entre le volume et la distance ($\frac{volume}{distance}$).

Dans la simulation, nous avons mis les déchets nationaux et internationaux dans la catégorie « A », car la somme de ces deux déchets représente 80 % du volume total du système. Tous les autres types de déchets ont un faible volume et peuvent donc être regroupés dans la catégorie « B ».

Enfin, on souligne que dans cette stratégie, nous avons besoin d'un seul chauffeur qui travaille de 8 h 00 à 17 h 00, contrairement à la situation actuelle dans laquelle un chauffeur est nécessaire 24 h sur 24. De plus, nous avons décidé de faire des tournées des déchets en alternance, car dans certains cas, on ne peut pas laisser un déchet pendant longtemps sans le ramasser, car cela peut générer des mauvaises odeurs, de la décomposition et d'autres problèmes (surtout en été). Ceci dit, si jamais il n'y a pas de déchets du groupe « B » à ramasser, le camion commence une tournée du groupe « A ». Enfin, comme dans la stratégie 1, le camion sera en pause et retournera au garage s'il n'a pas de déchets à ramasser ou à transporter.

Le processus de décision de l'agent camion est expliqué dans la figure ci-dessous.

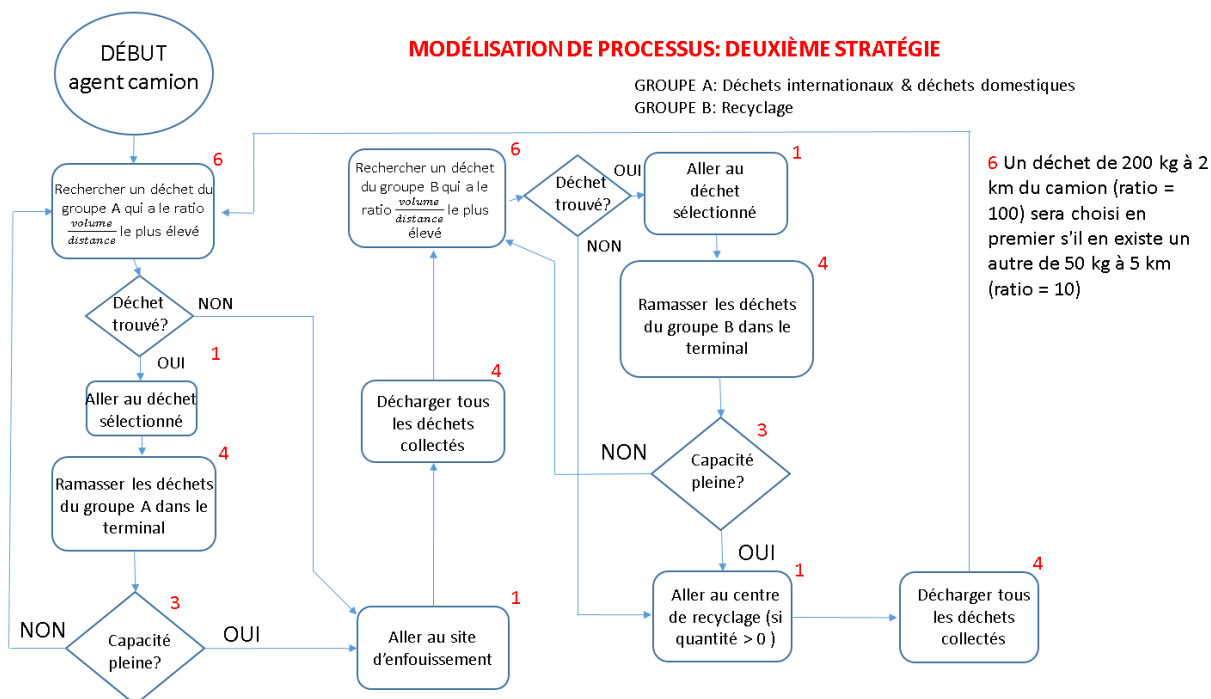


Figure 5.5: Processus de décision des agents dans la stratégie 2

5.2.5 Stratégie 3

Dans cette stratégie, une approche de livraison directe des terminaux aux centres de revalorisation et traitement final a aussi été adoptée. Cette stratégie cherche à éviter les coûts de main-d'œuvre liés au triage et opte ainsi pour une séparation à la source, puisque les navires trient déjà leurs déchets. De cette manière, un agent distributeur qui effectue un deuxième transport des déchets n'est plus nécessaire.

Dans la stratégie 3, nous considérons la même classification des déchets que pour la stratégie 2. La seule différence entre les 2 stratégies est le critère de décision que le camion utilise pour définir le terminal à visiter. Ainsi, le camion choisit toujours le terminal le plus proche de sa position actuelle, tant que des déchets sont présents dans ledit terminal (peu importe le volume de ces déchets). Ce critère est le même utilisé par la stratégie 1.

Pour mener à bien cette stratégie, il faut aussi suivre le processus décrit dans la section 5.1. Les capteurs sont cependant placés dans le camion au lieu du conteneur, afin de connaître à tout moment leur poids et leur capacité restante.

Nous faisons aussi ici l'hypothèse que tous les déchets de la catégorie « A » ont la même destination finale. Les déchets de catégorie « B » ont plusieurs destinations finales différentes, mais aux fins de la simulation, nous n'avons placé qu'un seul déchet dans le groupe « B », ayant un seul centre de revalorisation et traitement. Comme pour la stratégie précédente, le modèle peut facilement être étendu à plusieurs types de déchets.

Comme dans la stratégie 2, nous avons aussi décidé de faire la tournée des déchets toujours en alternance, car dans certains cas, on ne peut pas laisser un déchet pendant longtemps sans le ramasser, pour les mêmes raisons. S'il n'y a pas de déchets du groupe « B » à ramasser, le camion commence aussi une tournée du groupe « A ».

Comme dans la stratégie 1 et 2, le camion est en pause et retournera au garage s'il n'a pas de déchets à ramasser ou à transporter. On souligne que dans cette stratégie, nous avons besoin d'un seul chauffeur qui travaille de 8 h 00 à 17 h 00, contrairement à la situation actuelle dans laquelle un chauffeur est nécessaire 24 h sur 24. L'agent chauffeur a donc le comportement suivant.

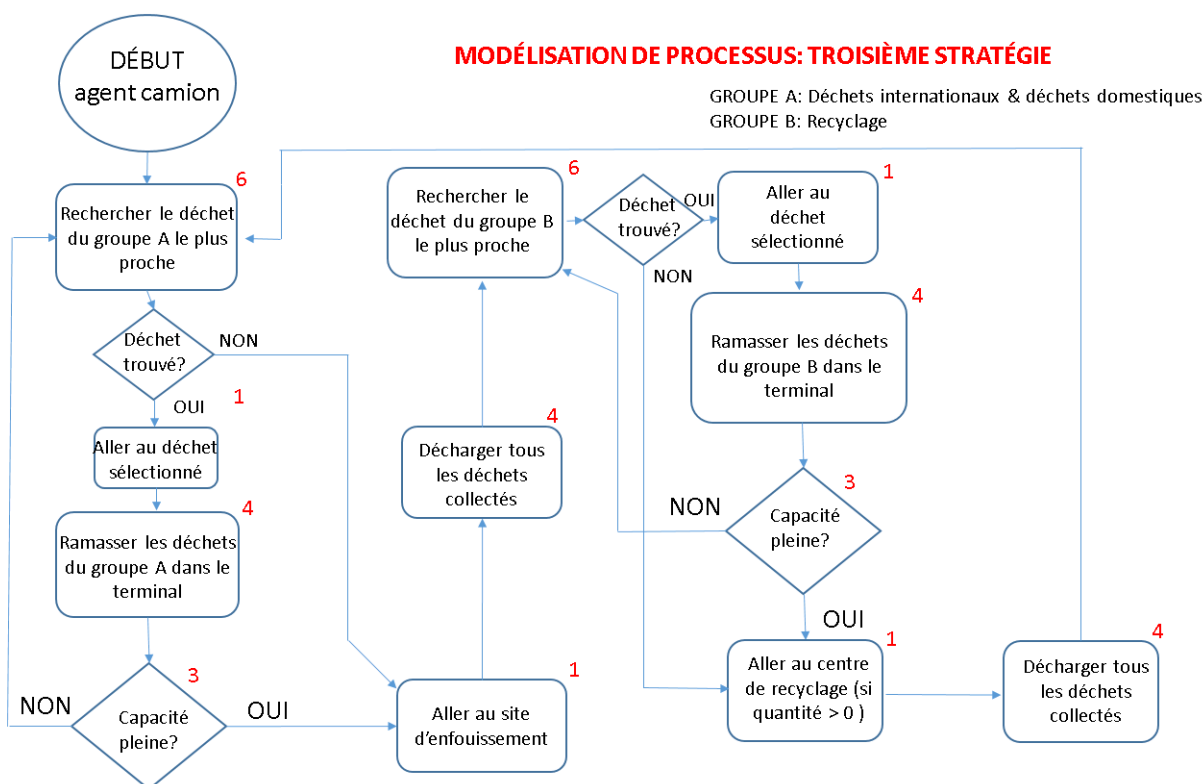


Figure 5.6: Processus de décision des agents dans la stratégie 3

5.3 Vérification du modèle

Afin de vérifier que le modèle programmé exécute bien ce qui est souhaité, nous avons vérifié le nombre de navires à la sortie des terminaux. Nous prévoyons ainsi en moyenne que chaque répétition de simulation produise 49 navires au cours de la semaine de simulation. La figure suivante montre que pour 30 répétitions, c'est effectivement le cas (la moyenne est de 49.2).

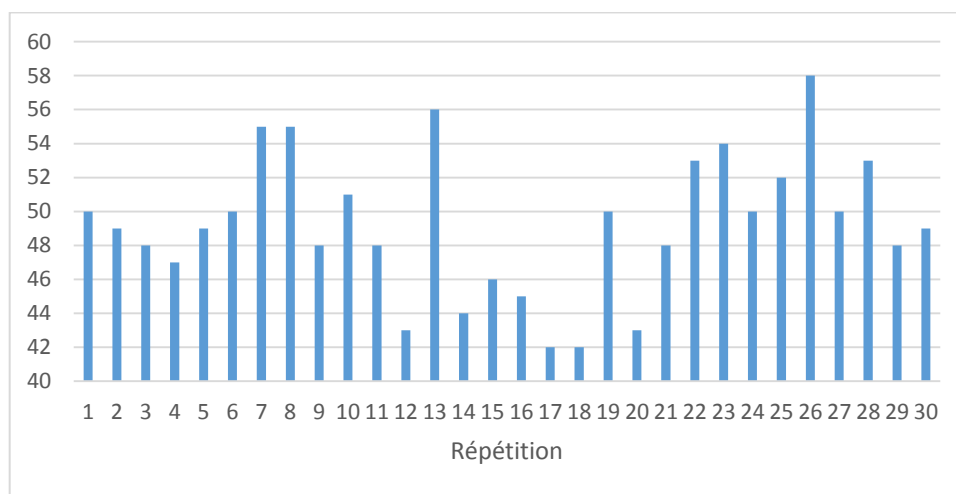


Figure 5.7: Nombre de navires par semaine par répétition

Ensuite, la quantité de déchets générée par type de déchets a été calculée, comme indiqué dans la figure suivante :

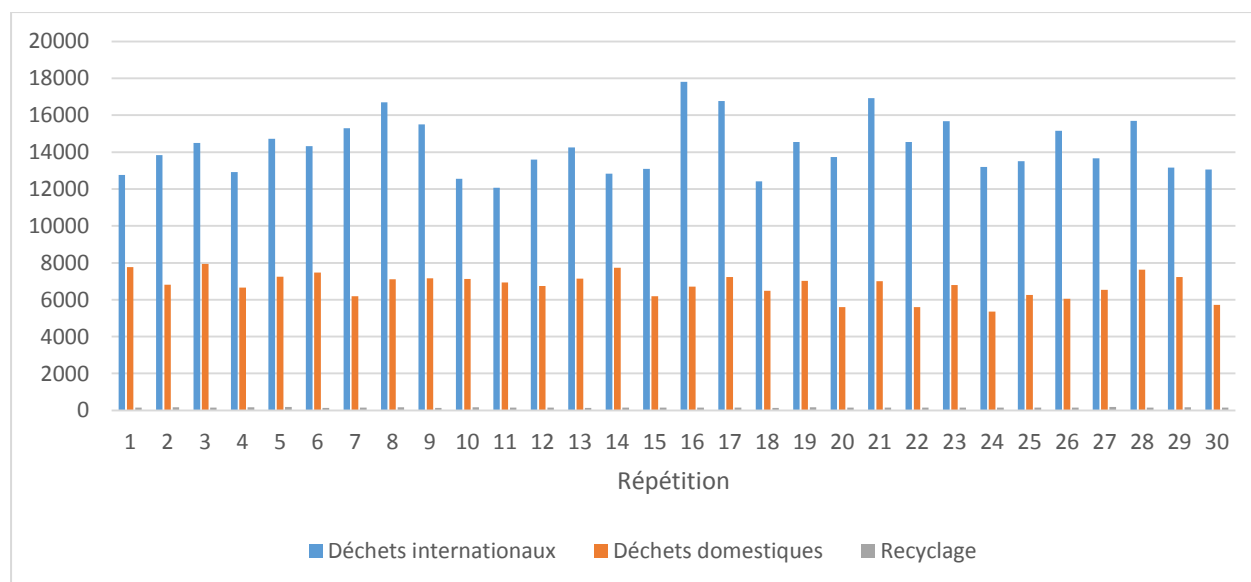


Figure 5.8: Quantité de déchets générée dans une semaine de simulation.

La moyenne obtenue pour les déchets internationaux est de 14 284 kg, pour les déchets domestiques de 7 074 kg et pour le recyclage de 160 kg.

Par conséquent, au niveau de la génération des déchets, nous avons ainsi validé le fait que la quantité de déchets générée et le nombre de navires entrants sont similaires à ceux attendus.

5.4 Expériences

Dans cette étude, nous avons réalisé 3 séries d'expériences. La première série d'expériences est une analyse de la convergence des 3 stratégies simulées selon les 2 scénarios de demande expliqués à la section précédente (Section 5.5). L'objectif est premièrement de vérifier que les résultats des simulations convergent en accroissant le nombre de répétitions. Deuxièmement, l'objectif est de connaître la performance de chaque stratégie dans chaque scénario.

La seconde série d'expériences est une analyse de sensibilité des 3 stratégies, selon les 2 scénarios de demande, mais pour une fréquence d'arrivée de bateau et un volume de déchets un peu différents (Section 5.6). L'objectif est ici d'étudier la sensibilité des 3 stratégies à une demande différente.

Finalement, la troisième série d'expériences consiste à étudier l'impact d'une implémentation progressive des stratégies 2 et 3, en étudiant ainsi des stratégies hybrides avec la stratégie 1 actuelle, dont les détails sont expliqués à la Section 5.7.

5.5 Analyse de convergence

Dans cette section, 2 groupes d'analyse et de graphiques sont présentés pour chaque sous-expérience. Dans le premier groupe, les résultats individuels de chaque répétition de simulation sont présentés. Dans le deuxième groupe, la moyenne cumulée des résultats de chaque répétition de chaque combinaison de stratégie et scénario (données enregistrées au fur et à mesure que les répétitions sont effectuées) est présentée afin de voir la valeur vers laquelle la série converge. 30 répétitions sont ainsi faites pour chaque expérience.

Dans chaque graphique, la stratégie et le scénario présentés sont indiqués à droite. Par exemple, S3 S1 signifie que la stratégie 3 - scénario 1 est présentée.

5.5.1 Stratégie 1

Les figures suivantes montrent les résultats individuels de chacune des répétitions obtenues à partir de la simulation de la stratégie 1, tant pour le scénario 1 que pour le 2. Nous rappelons que cette stratégie décrit la situation actuelle dans le port de Montréal et servira à comparer les avantages et les inconvénients des stratégies suivantes.

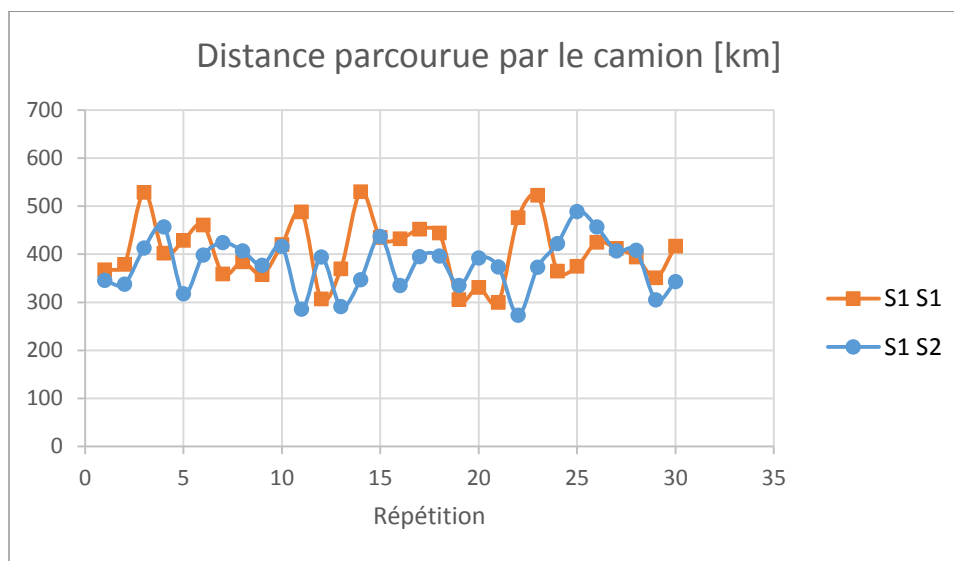


Figure 5.9: Distance parcourue par le camion dans la stratégie 1

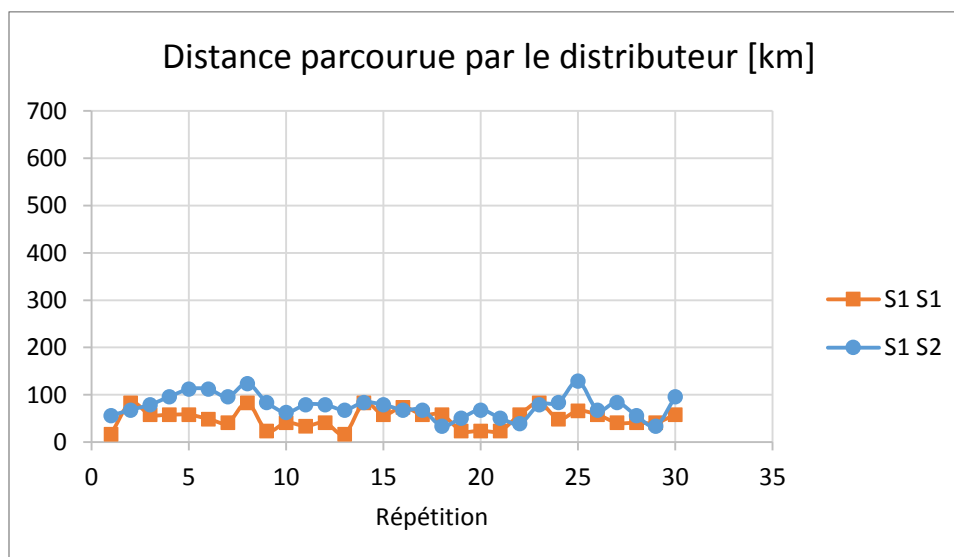


Figure 5.10: Distance parcourue par le distributeur dans la stratégie 1

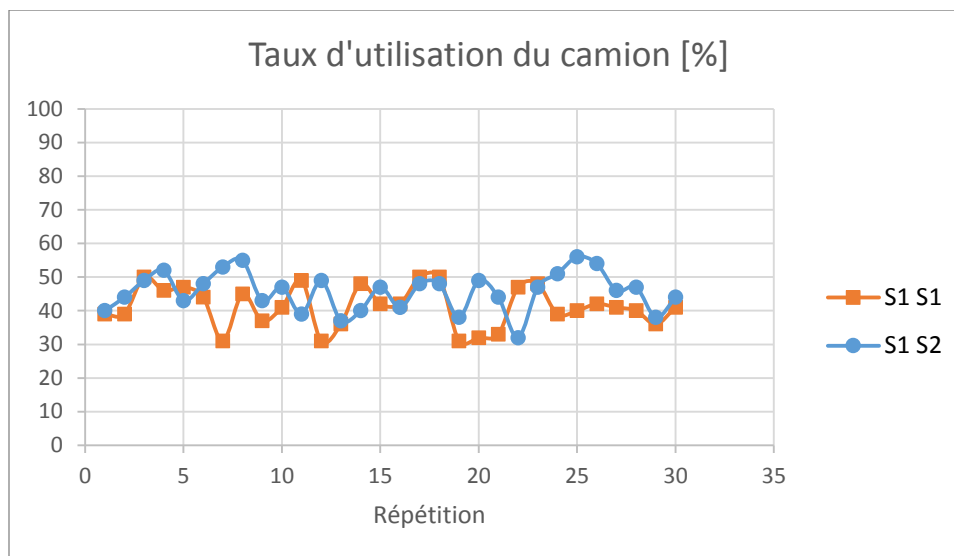


Figure 5.11: Taux d'utilisation du camion dans la stratégie 1

Naturellement, il y a une variabilité entre chaque répétition liée à la variabilité des données de génération des déchets. Le modèle de simulation est en effet paramétré avec des distributions de probabilité, de sorte que des valeurs différentes de demande sont obtenues à chaque fois, tout en restant dans les limites souhaitées. Nous pouvons observer ici, que la stratégie 1, actuellement utilisée dans le Port de Montréal, sembler avoir une performance similaire dans les deux scénarios de demande étudiés. Nous montrons maintenant les graphiques de moyenne mobile pour voir les valeurs convergentes des séries.

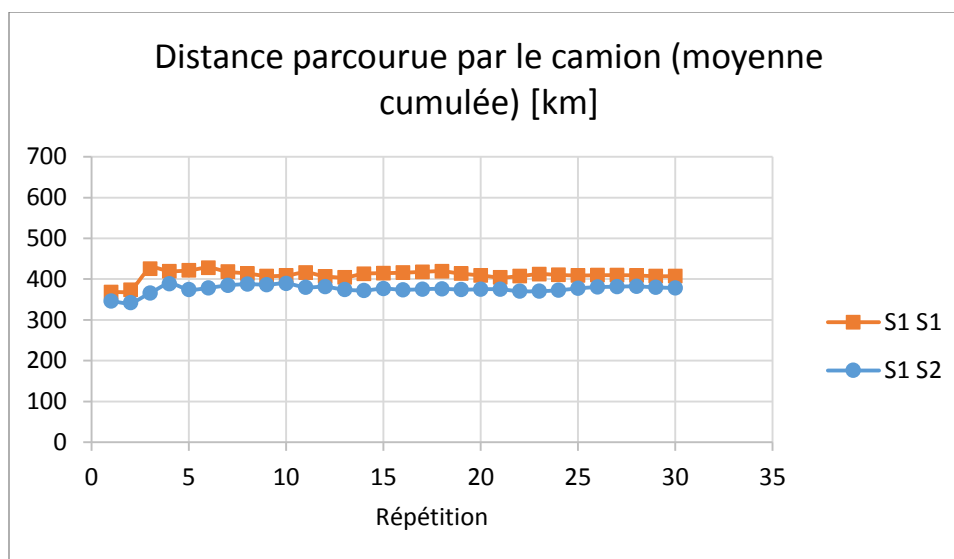


Figure 5.12: Distance parcourue par le camion dans la stratégie 1 (moyenne cumulée)

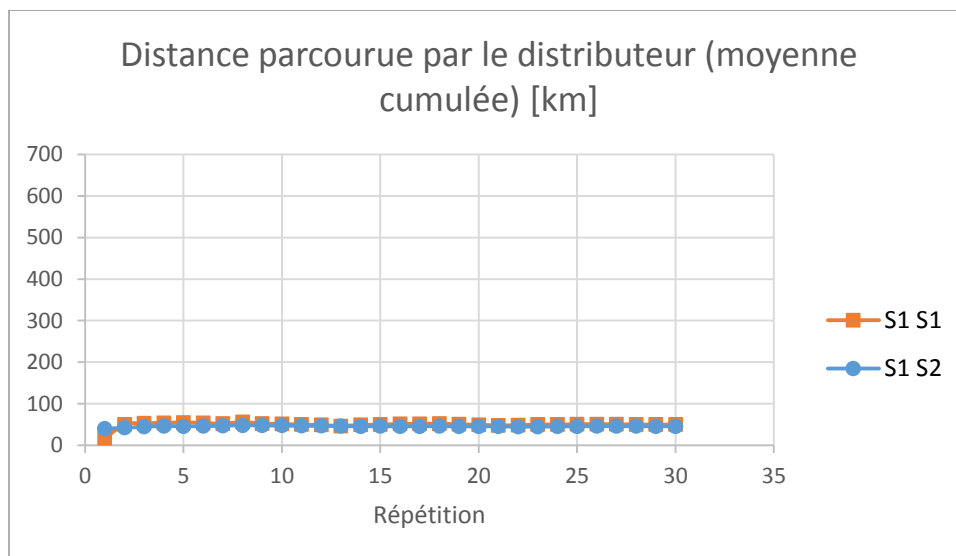


Figure 5.13: Distance parcourue par le distributeur dans la stratégie 1 (moyenne cumulée)

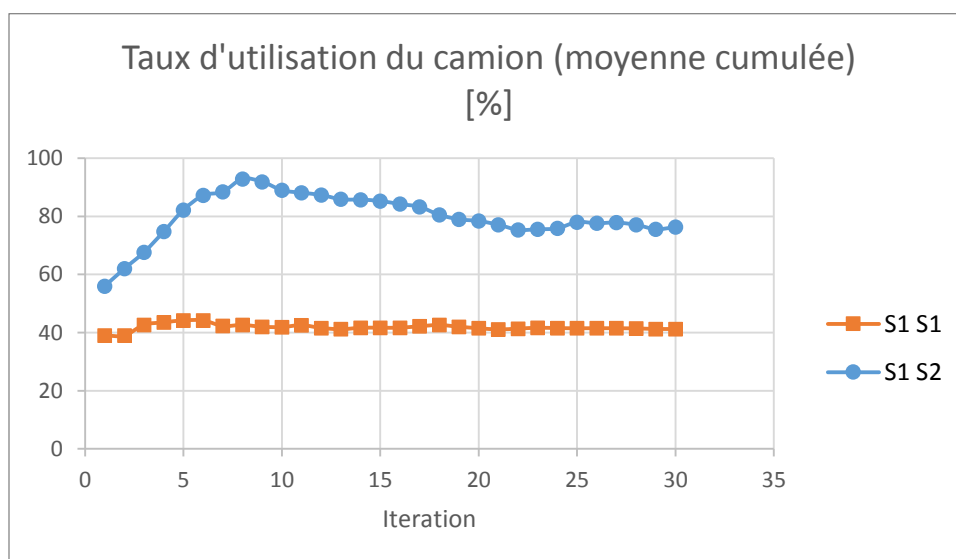


Figure 5.14: Taux d'utilisation du camion dans la stratégie 1 (moyenne cumulée)

Nous notons qu'actuellement dans le scénario 1, le camion de collecte des déchets parcourt une distance moyenne de 407 km par semaine, avec un taux d'utilisation de 41 %. De son côté, l'agent de distribution parcourt 50 km par semaine. Par contre, pour le scénario 2, nous observons que le camion parcourt un peu moins avec en moyenne 378 km au cours d'une semaine avec un taux d'utilisation un peu supérieur de 45 %. Le distributeur a parcouru 76 km au cours de la même semaine. Il est ainsi logique que les résultats soient différents, car la variabilité associée au scénario

2 est plus importante. En plus, nous notons qu'il faut un peu plus de répétitions pour atteindre la stabilité dans le scénario numéro 2, comparé au scénario 1.

Nous constatons également que le scénario 2 comportait un taux d'utilisation un peu plus élevé que le scénario 1, mais que la distance parcourue était inférieure.

Si le camion fait moins de kilomètres, c'est peut-être parce que dans le scénario 2 la demande est plus concentrée dans quelques terminaux, alors que dans le scénario 1 le camion peut également aller dans tous les terminaux. Cela peut aussi expliquer le plus haut taux d'utilisation.

5.5.2 Stratégie 2

Nous rappelons que la stratégie 2 n'utilise pas l'agent distributeur, on ne verra donc que 2 graphiques par groupe au lieu de 3.

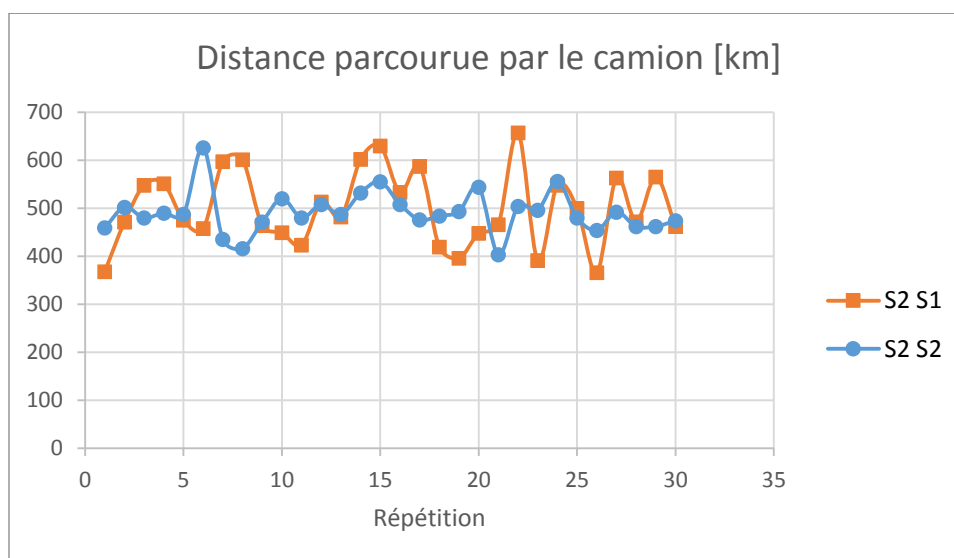


Figure 5.15: Distance parcourue par le camion dans la stratégie 2

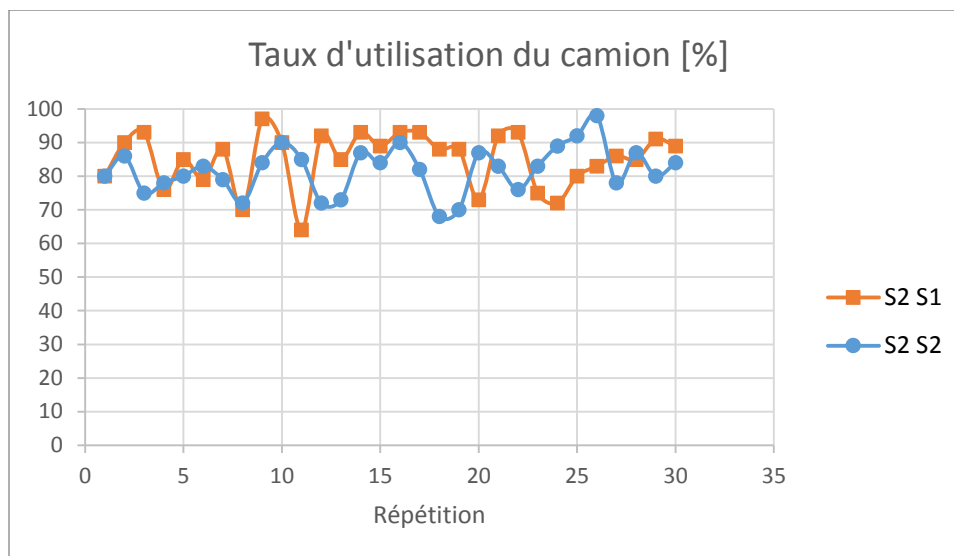


Figure 5.16: Taux d'utilisation du camion dans la stratégie 2

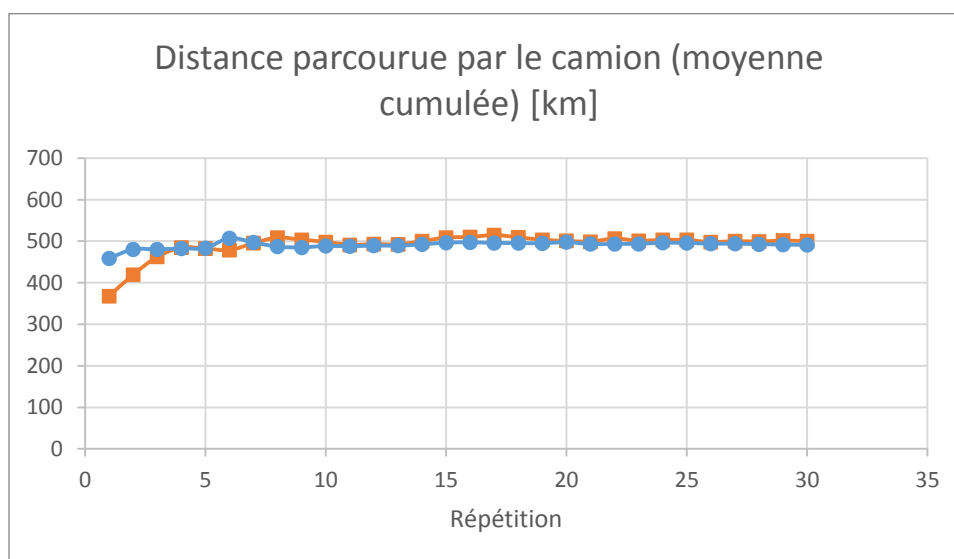


Figure 5.17: Distance parcourue par le camion dans la stratégie 2 (moyenne cumulée)

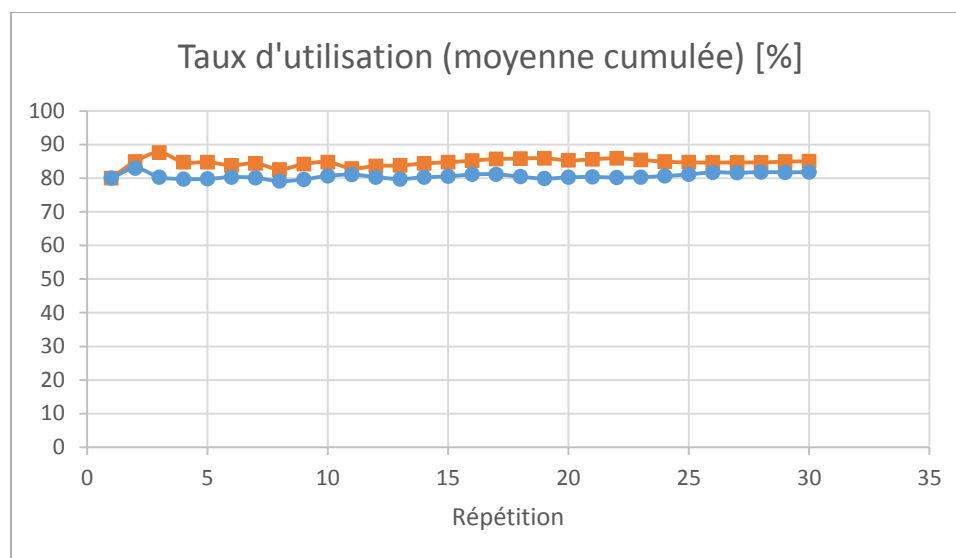


Figure 5.18: Taux d'utilisation du camion dans la stratégie 2 (moyenne mobile)

Nous constatons maintenant que le camion parcourt une moyenne de 500 km par semaine, avec un taux d'utilisation associé de 85 % pour le scénario 1 et 81 % pour le scénario 2. Bien que cette stratégie implique une distance parcourue légèrement plus grande (3 % de plus), ses avantages sont significatifs. D'une part, nous constatons une utilisation plus efficace du camion (85 % au lieu de 41 %). D'autre part, nous réalisons des économies majeures en évitant complètement le tri. Nous évitons non seulement le temps nécessaire à la main-d'œuvre pour effectuer ce triage, mais également le transport improductif de tous ces déchets. En plus, un seul chauffeur est nécessaire, au contraire de la stratégie 1 où un chauffeur doit être disponible 24 h sur 24.

Dans la section 5.6, nous vérifierons avec l'analyse de sensibilité si cette stratégie est réalisable au cas où les niveaux de déchets dans le système augmentent ou si le taux d'arrivées des bateaux augmente.

Comme dans la stratégie 1, les résultats obtenus d'un scénario à l'autre étant très similaires, nous pouvons affirmer que cette stratégie est également compatible avec le scénario 2.

5.5.3 Stratégie 3

La stratégie 3, comme la stratégie 2, n'utilise pas l'agent distributeur.

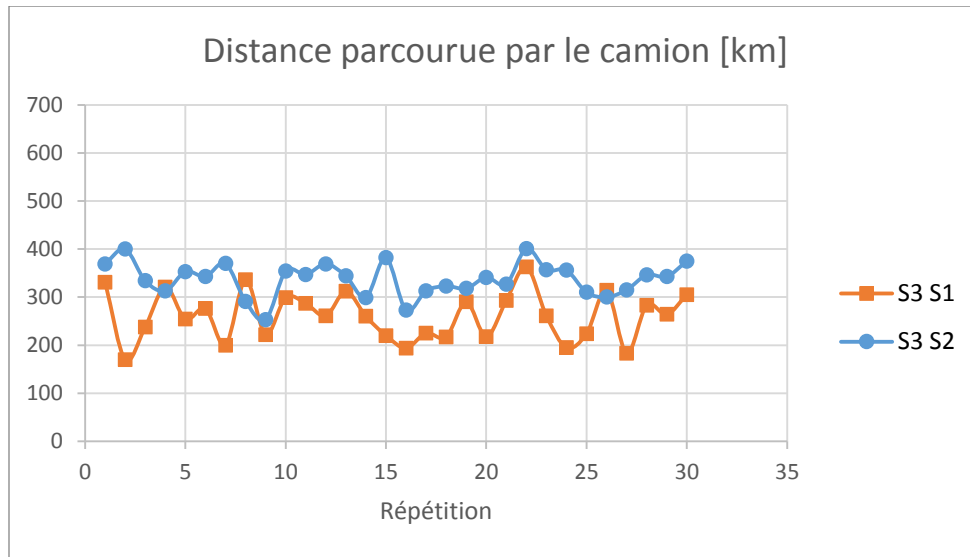


Figure 5.19: Distance parcourue par le camion dans la stratégie 3

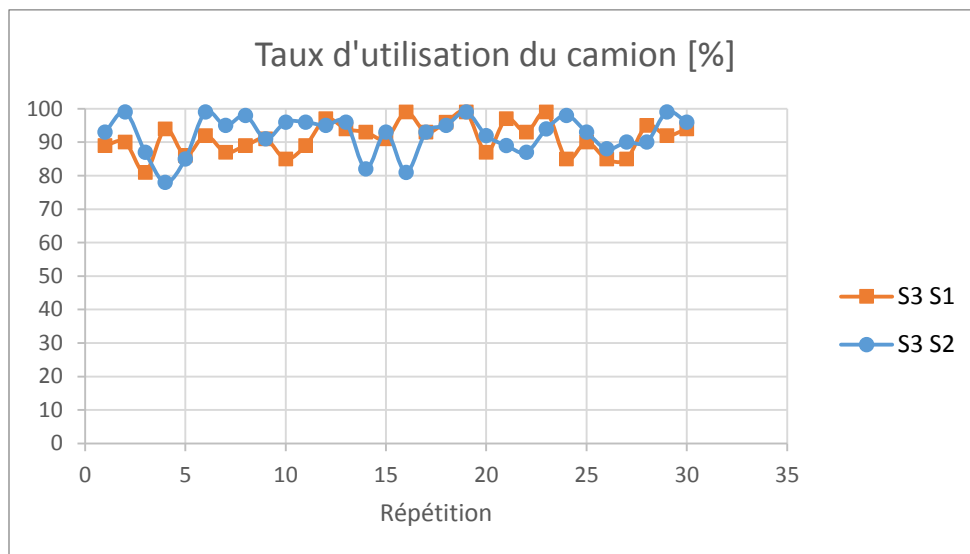


Figure 5.20: Taux d'utilisation du camion dans la stratégie 3

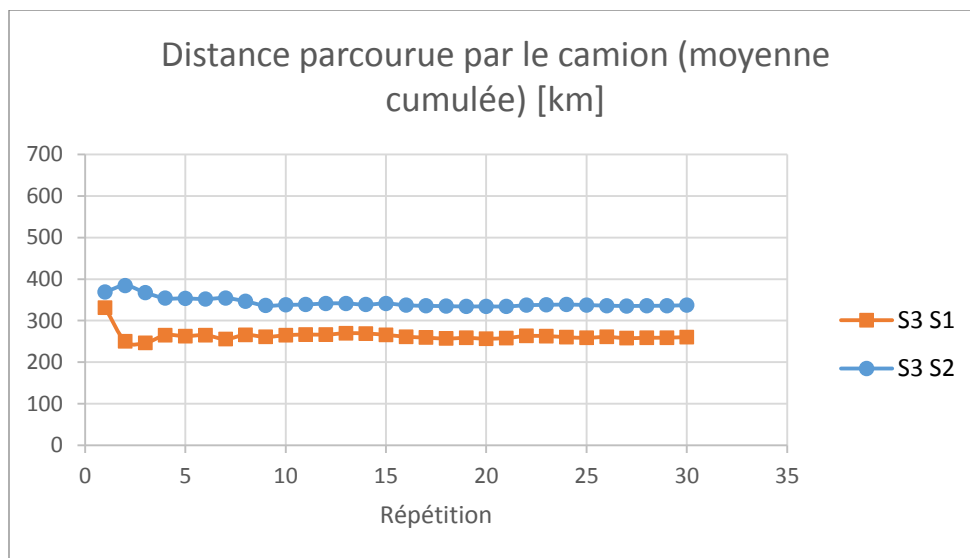


Figure 5.21: Distance parcourue par le camion dans la stratégie 3 (moyenne mobile)

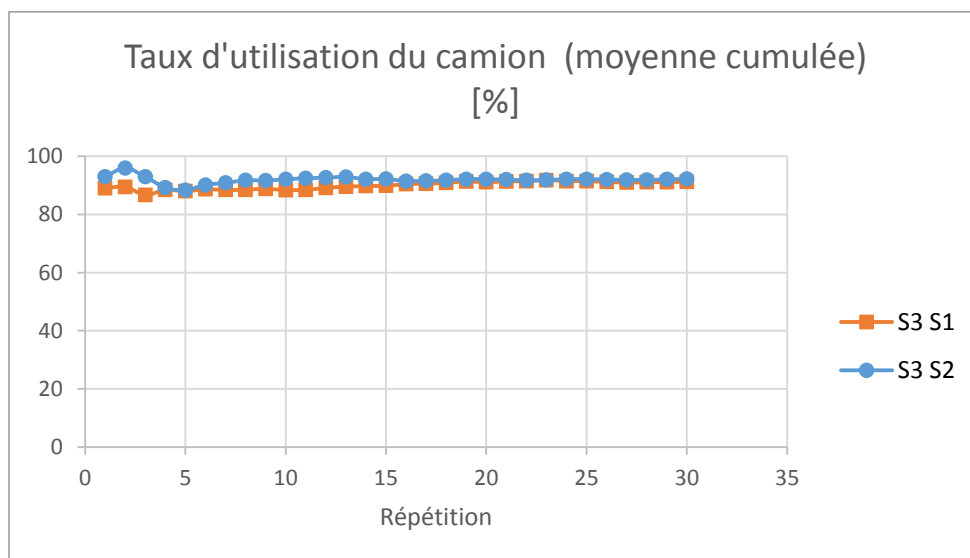


Figure 5.22: Taux d'utilisation du camion dans la stratégie 3 (moyenne mobile)

Dans cette dernière stratégie, le camion parcourt 260 km avec un taux d'utilisation de 91 %. Il est intéressant de noter le faible nombre de kilomètres que le camion doit parcourir (grâce au fait que le camion choisit de toujours se rendre au terminal le plus proche). Cependant, le taux d'utilisation du camion est très élevé, ce qui pourrait faire que cette stratégie difficilement réalisable en cas d'augmentation de déchets dans le système ou d'augmentation de l'arrivée de navires. Nous vérifierons cela dans la Section 5.6.

Finalement, nous observons une distance parcourue plus grande pour le scénario 2 que pour le scénario 1, mais toujours au-dessous de la situation actuelle.

5.5.4 Synthèse de la première série d'expériences

Dans cette première série d'expériences, nous voyons que la stratégie 3 est celle pour laquelle le moins de kilomètres sont nécessaires pour effectuer la collecte. Cependant, pour y parvenir, cette stratégie a le taux d'utilisation le plus élevé des 3 stratégies.

Ainsi, il est intéressant de minimiser la distance parcourue. Cependant, nous devons également prendre en compte la faisabilité de la stratégie dans les différents scénarios.

La stratégie 2 vient en deuxième position. Elle nécessite un peu plus de kilomètres que la stratégie 3, mais son taux d'utilisation du camion est moins élevé.

Finalement, la stratégie 1 (actuelle) est celle où le camion n'est pas utilisé de manière efficace. Cette stratégie n'est donc pas attrayante.

5.6 Analyse de sensibilité

Afin d'enrichir l'analyse présentée dans la section précédente, et en même temps valider le fonctionnement du modèle, nous avons réalisé une deuxième série d'expériences consistant en plusieurs analyses de sensibilité. Cette validation est faite qualitativement puisque les données nécessaires pour faire une validation quantitative ont été jugées confidentielles. Dans une première partie, nous avons analysé l'impact d'une augmentation du taux d'arrivées des navires (à volume constant). Dans un deuxième temps, nous avons analysé l'impact d'une augmentation du volume de déchets (à fréquence constante).

5.6.1 Augmentation du taux d'arrivées des navires

Actuellement, environ 49 bateaux visitent par semaine dans les terminaux du port de Montréal. Dans cette section, nous étudions l'impact si ce taux hebdomadaire augmentait de 10 %, 25 % et 50 %. Nous ne montrons dans cette section que les tableaux synthèses pour certains scénarios afin de faciliter la lecture du mémoire. Le tableau complet se trouve en annexe.

5.6.1.1 Stratégie 1

Dans un premier temps, nous présentons l'impact de l'augmentation du taux d'arrivées sur la stratégie actuelle (1). Le tableau suivant synthétise les résultats en présentant la moyenne de 30 répétitions.

Tableau 5.1: Augmentation du taux d'arrivée stratégie 1 scénario 1

<u>scénario</u>	<u>stratégie</u>	<u>taux d'arrivées additionnel</u> [%]	<u>volume additionnel</u> [%]	<u>distance parcourue par le camion</u> [km]	<u>distance parcourue par le distributeur</u> [km]	<u>taux utilisation camion</u> [%]
1	1	0	0	407	50	41
1	1	10	0	365	42	45
1	1	25	0	414	46	52
1	1	50	0	438	62	58

On note ainsi que le taux d'utilisation du camion est directement proportionnel à l'augmentation du taux d'arrivées des bateaux. Comme le volume est considéré constant (similaire à la première série d'expériences), nous pouvons assumer que si le taux d'utilisation du camion augmente, nous pouvons aussi assumer que le taux de remplissage du camion est lui plus bas.

En ce qui concerne la distance parcourue, la même chose ne se produit pas. Cette dernière a en effet tendance à augmenter alors que le taux d'arrivées augmente également (mais pas proportionnellement). Même avec l'hypothèse où il y a 50 % de navires en plus qui arrivent au port, le camion n'est pas utilisé efficacement, avec seulement 58 % du temps.

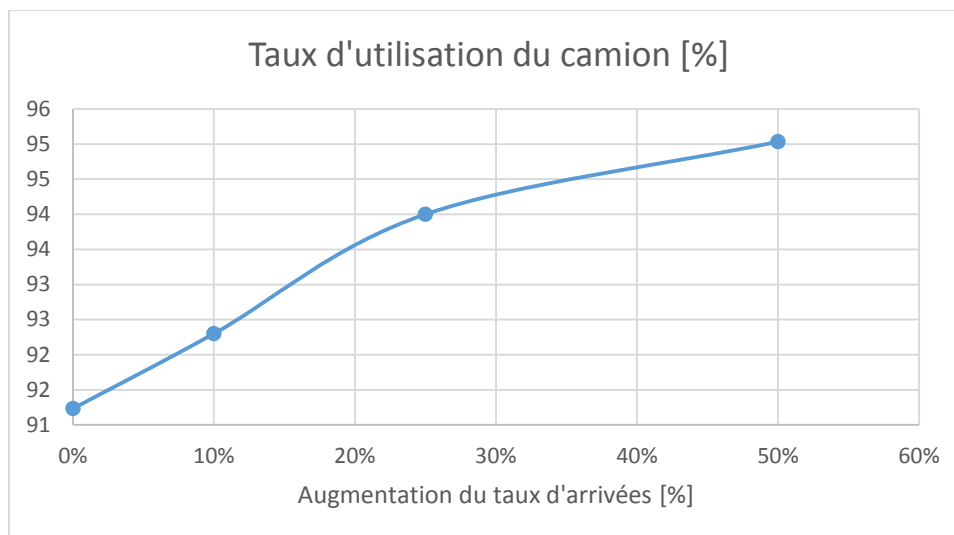


Figure 5.23: Taux d'utilisation du camion en fonction du taux d'arrivées

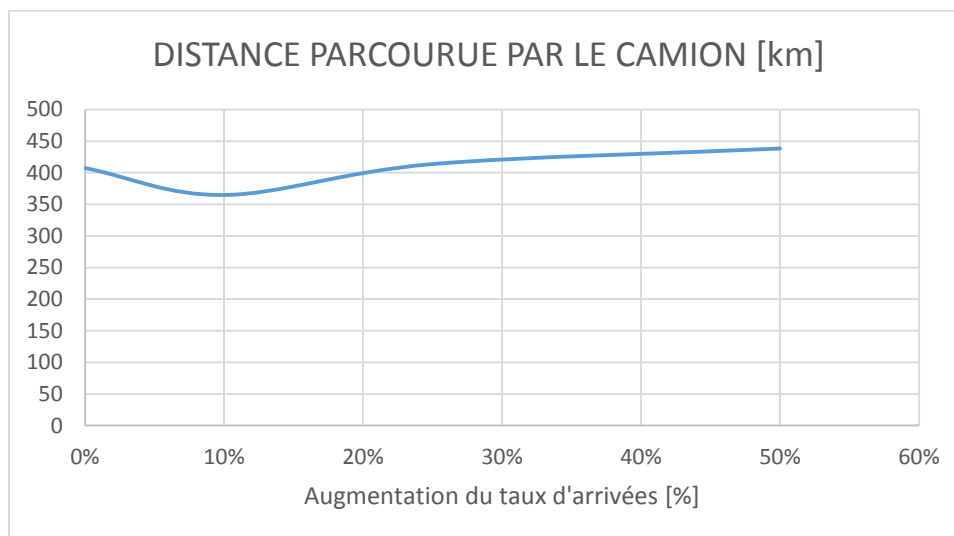


Figure 5.24: Distance parcourue du camion en fonction du taux d'arrivées

5.6.1.2 Stratégie 2

Dans un deuxième temps, nous présentons l'impact de l'augmentation du taux d'arrivées sur la stratégie 2. Le tableau suivant synthétise les résultats en présentant la moyenne de 30 répétitions.

Tableau 5.2: Augmentation du taux d'arrivées stratégie 2 - scénario 1

<u>scénario</u>	<u>stratégie</u>	<u>taux d'arrivées additionnel</u> [%]	<u>volume additionnel</u> [%]	<u>distance parcourue par le camion</u> [km]	<u>distance parcourue par le distributeur</u> [km]	<u>taux utilisation camion</u> [%]
1	2	0	0	500	-	85
1	2	10	0	517	-	86
1	2	25	0	496	-	87
1	2	50	0	518	-	92

Cette analyse montre qu'avec la stratégie 2, l'augmentation du nombre d'arrivées de navires ne provoque qu'une légère augmentation de la distance parcourue et du taux d'utilisation. Dans le cas où il y a 50 % de navires en plus qui arrivent chaque semaine, le camion pourrait néanmoins desservir efficacement tous les terminaux. On estime qu'un taux d'utilisation compris entre 85 % et 90 % est idéal, car c'est un point d'équilibre entre une occupation satisfaite de la ressource, tout gardant une marge pour les réparations, l'entretien ou d'autres problèmes.

5.6.1.3 Stratégie 3

Dans un troisième temps, nous présentons l'impact de l'augmentation du taux d'arrivées sur la stratégie 3. Le tableau suivant synthétise les résultats en présentant la moyenne de 30 répétitions. Comme indiqué précédemment, le faible nombre de kilomètres que le camion doit parcourir est intéressant avec cette stratégie. Cependant, le taux d'utilisation est très élevé depuis le début, comme mentionné dans la section précédente et continue d'augmenter régulièrement. Certaines répétitions ont même présenté un taux d'occupation du camion de 99,99 % (ce qui signifie en pratique une utilisation maximale), avec aucune marge pour des problèmes imprévus (ex., maintenance), du trafic sur la route, voire des pauses pour le chauffeur. Finalement, l'impact sur la distance parcourue par rapport à l'augmentation du taux d'arrivées n'est pas clair. Il semble en effet, qu'une augmentation du taux d'arrivées puisse augmenter l'opportunité de trouver des terminaux proches pour remplir le camion, diminuant ainsi la distance parcourue.

Tableau 5.3: Augmentation du taux d'arrivées stratégie 3 - scénario 1

<u>scénario</u>	<u>stratégie</u>	<u>taux d'arrivées additionnel</u> [%]	<u>volume additionnel</u> [%]	<u>distance parcourue par le camion</u> [km]	<u>distance parcourue par le distributeur</u> [km]	<u>taux utilisation camion</u> [%]
1	3	0	0	261	-	91
1	3	10	0	275	-	92
1	3	25	0	272	-	94
1	3	50	0	251	-	95

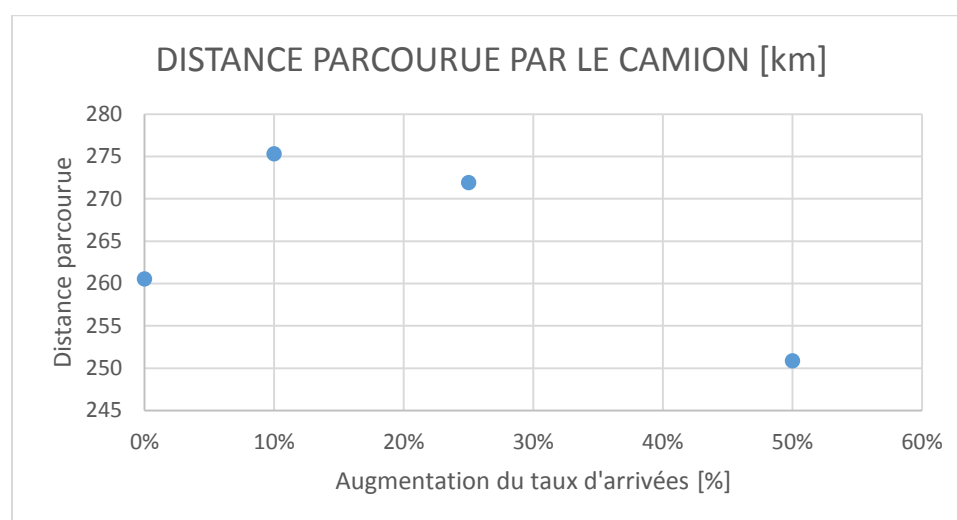


Figure 5.25: Distance parcourue du camion en fonction à l'augmentation du taux d'arrivées

5.6.2 Augmentation du volume des déchets

Actuellement, plus de 1,180 tonnes de déchets solides sont générées chaque année dans le port de Montréal. L'objectif de cette seconde analyse de sensibilité est d'étudier l'impact d'une augmentation de 10 %, 25 % et 50 % du volume de déchets, à fréquence constante (identique à la première série d'expériences présentée à la Section 5.5). Cela implique donc une augmentation de la moyenne des déchets générés par chaque bateau. Afin de faciliter la lecture de ce mémoire, nous montrons encore une fois que certains tableaux dans cette section. Les informations complètes sont disponibles en annexe.

5.6.2.1 Stratégie 1

Dans un premier temps, nous présentons l'impact de l'augmentation du volume de déchets sur la stratégie actuelle (1). Le tableau suivant synthétise les résultats en présentant la moyenne de 30 répétitions.

Tableau 5.4: Augmentation du volume de déchets stratégie 1 scénario 1

<u>scénario</u>	<u>stratégie</u>	<u>taux d'arrivées additionnel</u> [%]	<u>volume additionnel</u> [%]	<u>distance parcourue par le camion</u> [km]	<u>distance parcourue par le distributeur</u> [km]	<u>taux utilisation camion</u> [%]
1	1	0	0	407	50	41
1	1	0	10	352	44	43
1	1	0	25	328	44	40
1	1	0	50	332	59	40

Nous notons ici qu'une augmentation de la quantité de déchets n'a pratiquement aucun impact tant sur la distance parcourue que sur le taux d'utilisation du camion. Cela pourrait s'expliquer par une grande capacité de stockage du camion de type 'roll-on roll-off' utilisé pour la collecte.

5.6.2.2 Stratégie 2

Dans un deuxième temps, nous présentons l'impact de l'augmentation du volume de déchet sur la stratégie 2. Le tableau suivant synthétise les résultats en présentant la moyenne de 30 répétitions.

Tableau 5.5: Augmentation du volume de déchets stratégie 2 - scénario 1

<u>scénario</u>	<u>stratégie</u>	<u>taux d'arrivées additionnel</u> [%]	<u>volume additionnel</u> [%]	<u>distance parcourue par le camion</u> [km]	<u>distance parcourue par le distributeur</u> [km]	<u>taux utilisation camion</u> [%]
1	2	0	0	500	-	85
1	2	0	10	491	-	85
1	2	0	25	487	-	84
1	2	0	50	508	-	85

Encore une fois, l'augmentation des déchets n'influence pas significativement le résultat tant sur la distance parcourue que sur le taux d'utilisation du camion. Encore une fois, cela pourrait s'expliquer par une grande capacité de stockage du camion de type 'roll-on roll-off' utilisé pour la collecte.

5.6.2.3 Stratégie 3

Dans un troisième temps, nous présentons l'impact de l'augmentation du volume de déchets sur la stratégie 3. Le tableau suivant synthétise les résultats en présentant la moyenne de 30 répétitions.

Tableau 5.6: Augmentation du volume de déchets stratégie 3 - scénario 1

<u>scénario</u>	<u>stratégie</u>	<u>taux</u> <u>d'arrivées</u> <u>additionnel</u> <u>[%]</u>	<u>volume</u> <u>additionnel</u> <u>[%]</u>	<u>distance</u> <u>parcourue</u> <u>par le</u> <u>camion [km]</u>	<u>distance</u> <u>parcourue</u> <u>par le</u> <u>distributeur</u> <u>[km]</u>	<u>taux</u> <u>utilisation</u> <u>camion</u> <u>[%]</u>
1	3	0	0	261	-	91
1	3	0	10	272	-	92
1	3	0	25	297	-	92
1	3	0	50	288	-	92

Comme pour les autres stratégies, le taux d'utilisation reste constant alors que la distance parcourue n'augmente que légèrement à mesure que davantage de déchets sont générés.

5.6.3 Synthèse de la deuxième série d'expériences

Dans cette série d'expériences, nous avons progressivement augmenté le taux d'arrivées des navires et la quantité de déchets qu'ils apportent à leur arrivée, et nous observons encore une fois que la stratégie 3 atteint des niveaux d'utilisation du camion très élevés.

Cette analyse de sensibilité montre de plus que les stratégies 1 et 2 ont un impact positif sur la distance parcourue et le taux d'utilisation, mais qu'elles restent toujours en deçà d'une limite prudente, étant donné que nous n'avons pas pris en compte dans la simulation les conditions de circulation et les événements imprévus.

Il est important de noter finalement qu'une modification du taux d'arrivées des navires affecte considérablement la collecte, tandis qu'une modification du montant des volumes des déchets ne l'affecte pas de façon significative.

5.7 Étude du déploiement des stratégies

Dans cette troisième série d'expériences, nous étudions plus particulièrement le déploiement progressif des stratégies étudiées précédemment. Pour cela, nous définissons et simulons des stratégies hybrides qui combinent les stratégies étudiées précédemment.

Ainsi, dans le port de Montréal, il existe des terminaux générant une plus grande quantité de déchets que d'autres. Cela est notamment étudié dans le scénario 2 simulé précédemment, dans lequel nous avons des terminaux de grande, petite et moyenne taille en termes de génération de déchets. Par conséquent, dans un contexte où il ne serait pas possible de déployer une nouvelle stratégie à travers tous les terminaux du port, nous pouvons envisager un déploiement progressif dans lequel la stratégie actuelle (1) cohabite d'une certaine manière avec une nouvelle stratégie en déploiement. L'objectif de cette série d'expériences est donc de voir quelle configuration pourrait fonctionner le mieux dans le port de Montréal.

Bien que nous n'aspirions pas à trouver l'optimum en raison du grand nombre de combinaisons possibles, nous proposons d'étudier et de simuler quelques combinaisons particulières.

En bref, dans cette section, nous étudions le modèle en faisant en sorte que certains terminaux suivent la stratégie 1 et les autres suivent la stratégie 2 ou 3, selon le cas étudié.

Pour réaliser l'hybridation, nous plaçons les terminaux qui suivent la stratégie 1 en tête de liste (priorité de collecte), afin que les bateaux n'aient pas à attendre longtemps pour pouvoir décharger leurs déchets. Les autres terminaux sont visités selon les critères de la stratégie correspondante.

Si plusieurs terminaux qui suivent la stratégie 1 attendent en même temps pour être visités, le camion se rend toujours à celui qui est le plus proche de sa position actuelle.

Les stratégies suivantes sont donc étudiées exclusivement dans le scénario 2 et avec un seul chauffeur qui travaille de 8h à 17h.

5.7.1 Stratégie 4

Cette stratégie est un hybride entre la stratégie 1 et la stratégie 2. Les petits terminaux suivent l'approche de pilotage de S1 et les autres suivent l'approche de pilotage de S2. Les figures suivantes présentent les résultats obtenus.

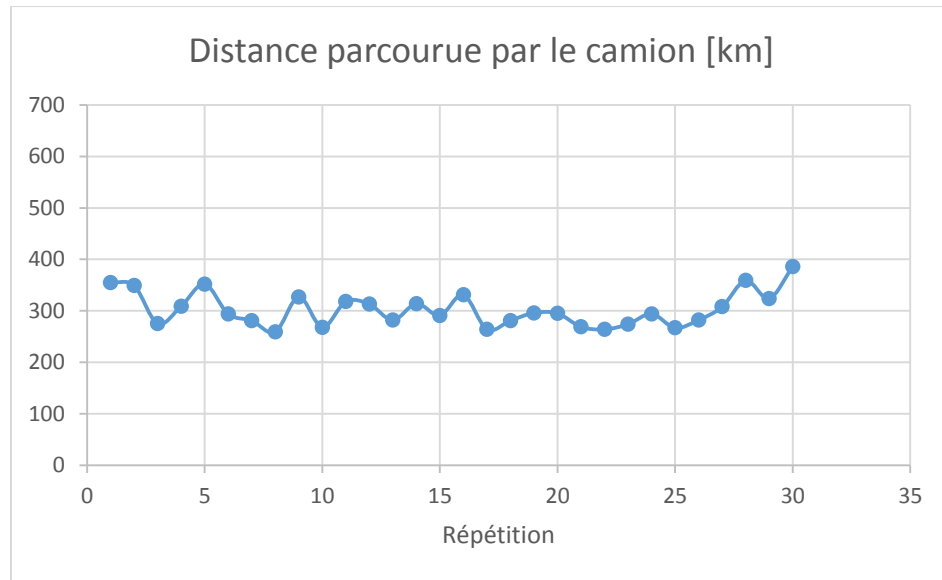


Figure 5.26: Distance parcourue par le camion dans la stratégie 4

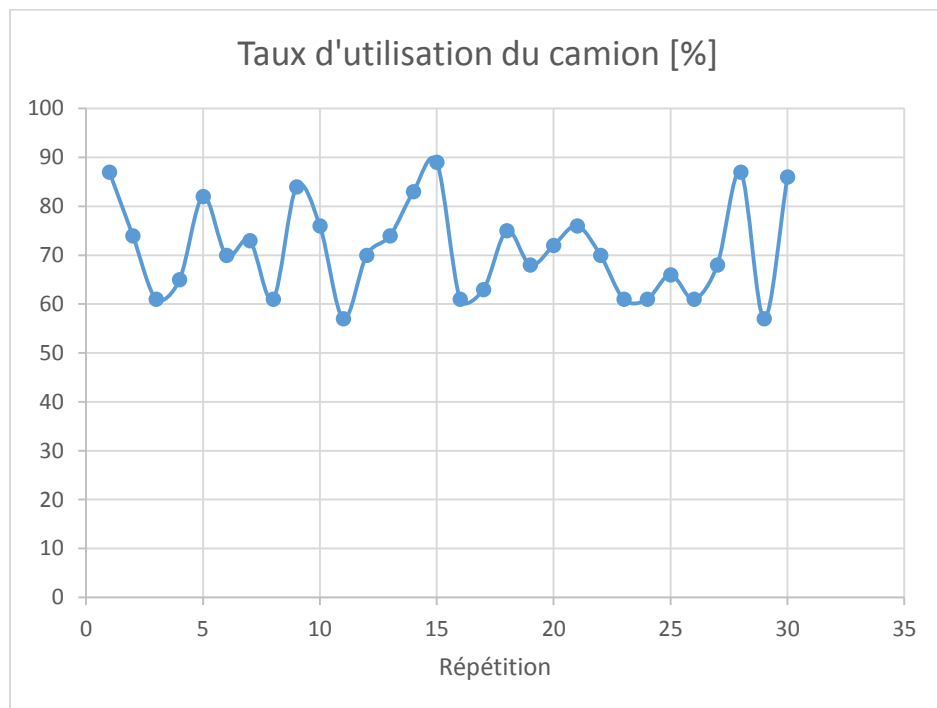


Figure 5.27: Taux d'utilisation du camion dans la stratégie 4

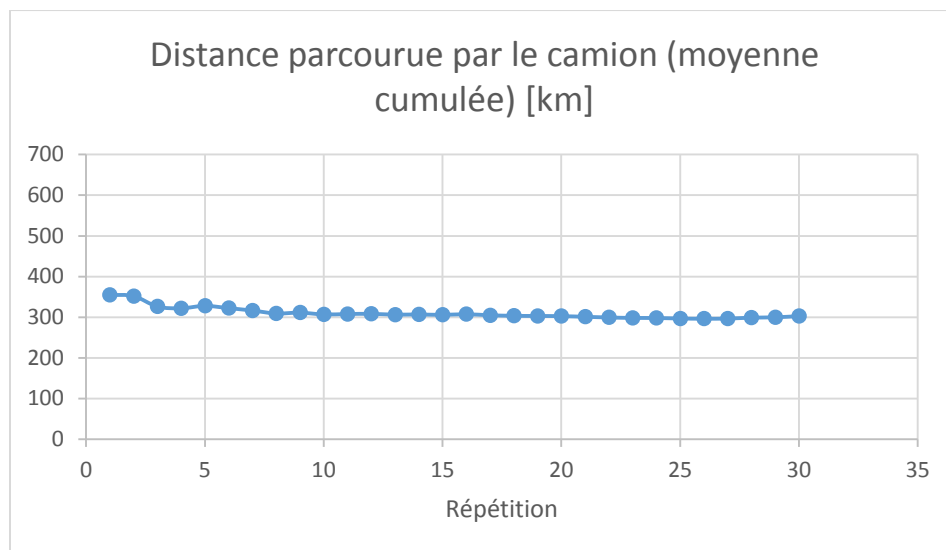


Figure 5.28: Distance parcourue par le camion dans la stratégie 4 (moyenne cumulée)

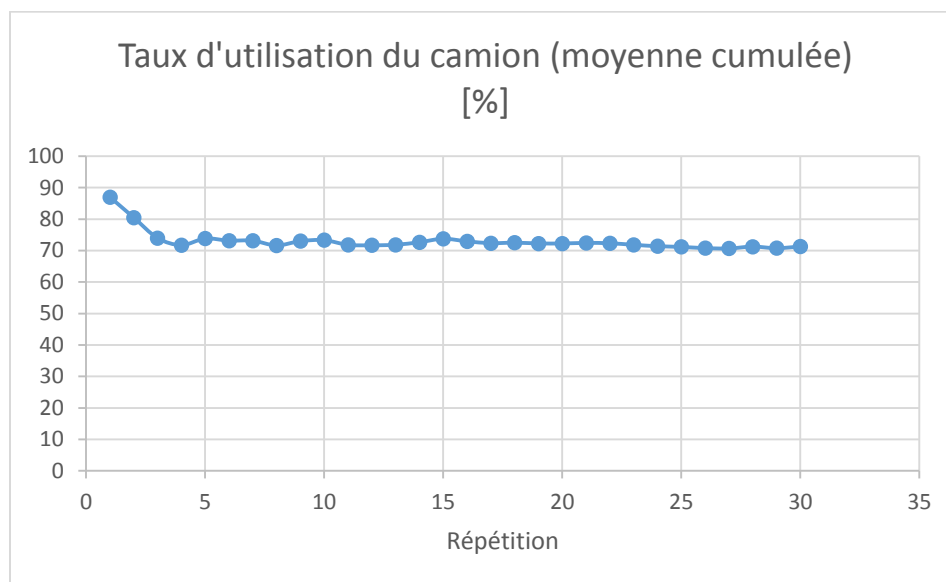


Figure 5.29: Taux d'utilisation du camion dans la stratégie 4 (moyenne cumulée)

Nous observons que dans la stratégie 4, le camion de collecte des déchets parcourt une distance moyenne de 302 km par semaine, avec un taux d'utilisation de 71 %. Ce résultat semble logique, car il s'agit d'une combinaison des stratégies 1 et 2 et le taux d'utilisation qui en résulte se situe au centre des taux d'utilisation individuels de ces stratégies.

5.7.2 Stratégie 5

Cette stratégie est un hybride entre la stratégie 1 et la stratégie 3. Les petits terminaux suivent l'approche de pilotage de S1 et les autres suivent l'approche de pilotage de S3. Les figures suivantes présentent les résultats obtenus.

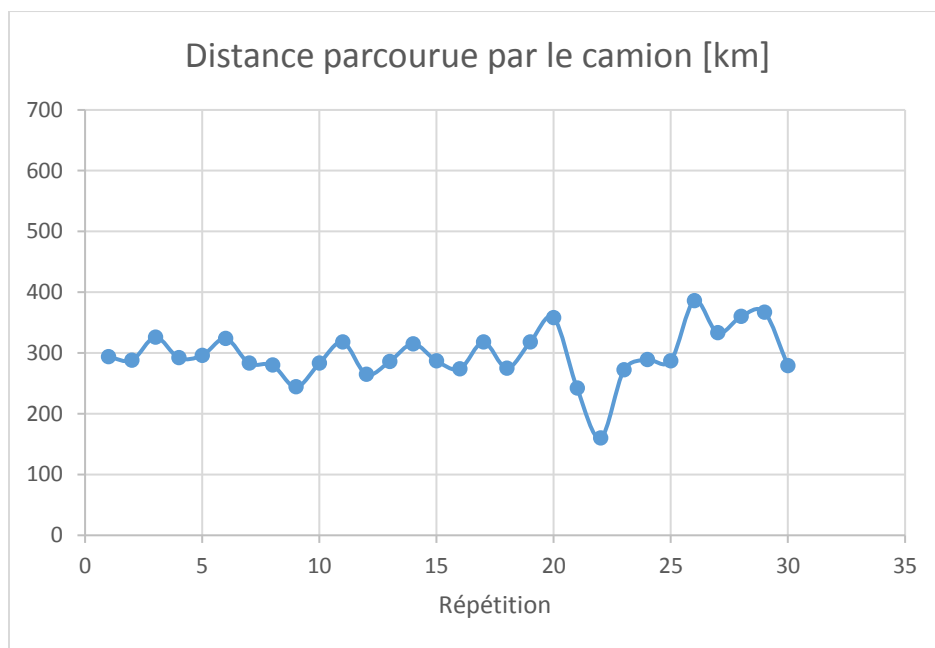


Figure 5.30: Distance parcourue par le camion dans la stratégie 5

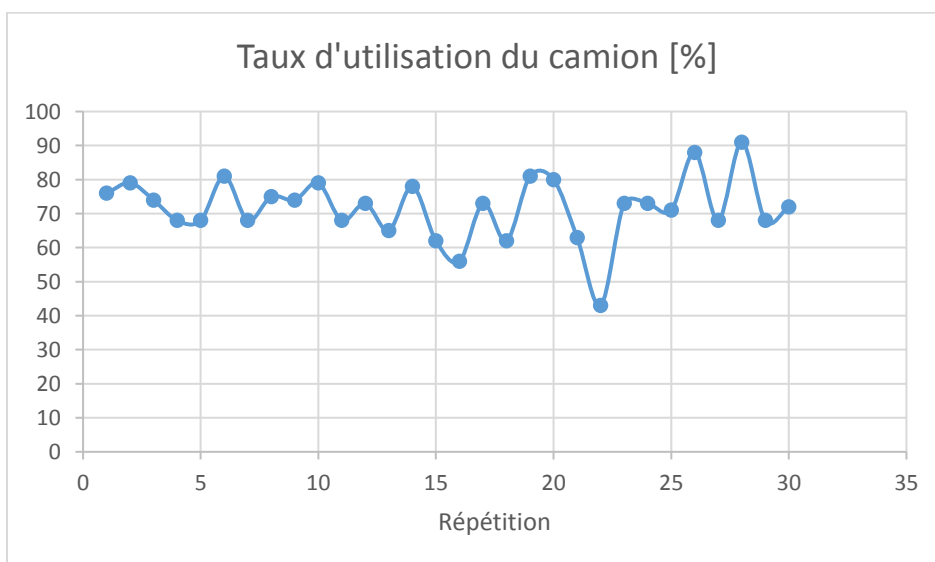


Figure 5.31: Taux d'utilisation du camion dans la stratégie 5

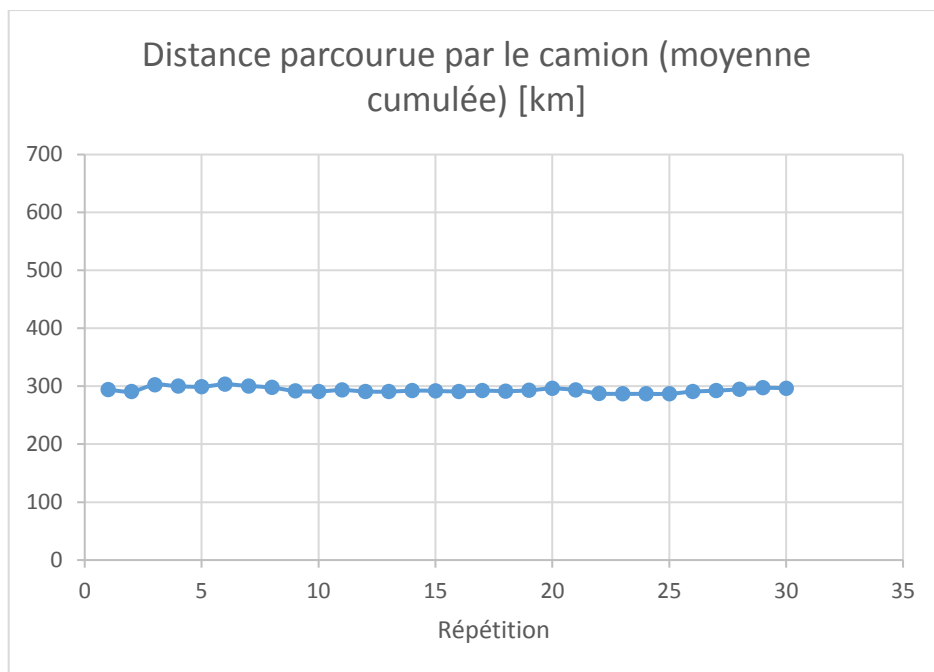


Figure 5.32: Distance parcourue par le camion dans la stratégie 5 (moyenne cumulée)

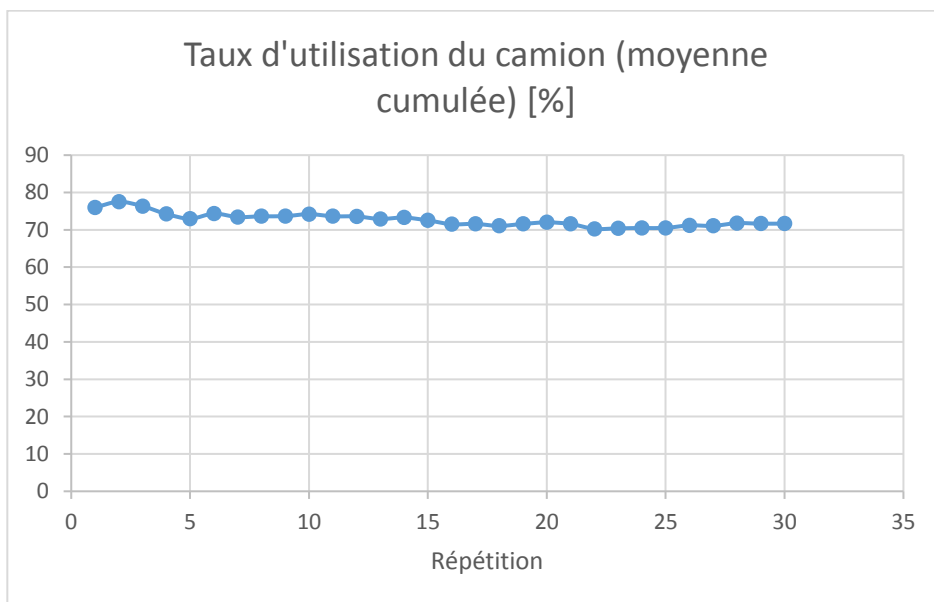


Figure 5.33: Taux d'utilisation du camion dans la stratégie 5 (moyenne cumulée)

Nous observons que dans la stratégie 5, le camion de collecte des déchets parcourt une distance moyenne de 296 km par semaine, avec un taux d'utilisation de 71 %. Ce résultat est très similaire à celui obtenu dans la stratégie 4, ce qui peut suggérer que le degré de déploiement influence davantage le résultat final que la stratégie choisie.

5.7.3 Stratégie 6

Cette stratégie similaire à la stratégie 4. Il s'agit donc d'un hybride entre la stratégie 1 et la stratégie 2. Cependant, ici, les petits et moyens terminaux suivent l'approche de pilotage de S1 et les grands suivent l'approche de pilotage de S2. Les figures suivantes présentent les résultats obtenus :

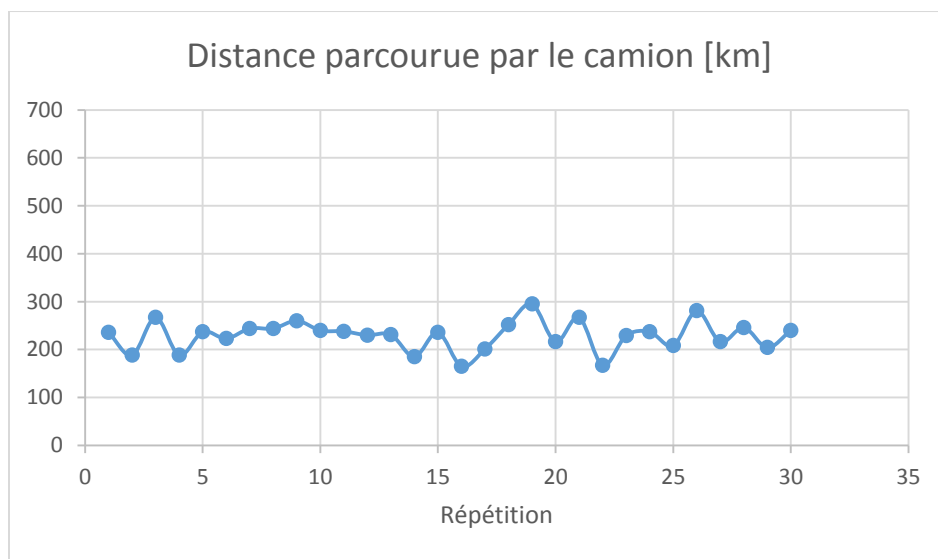


Figure 5.34: Distance parcourue par le camion dans la stratégie 6

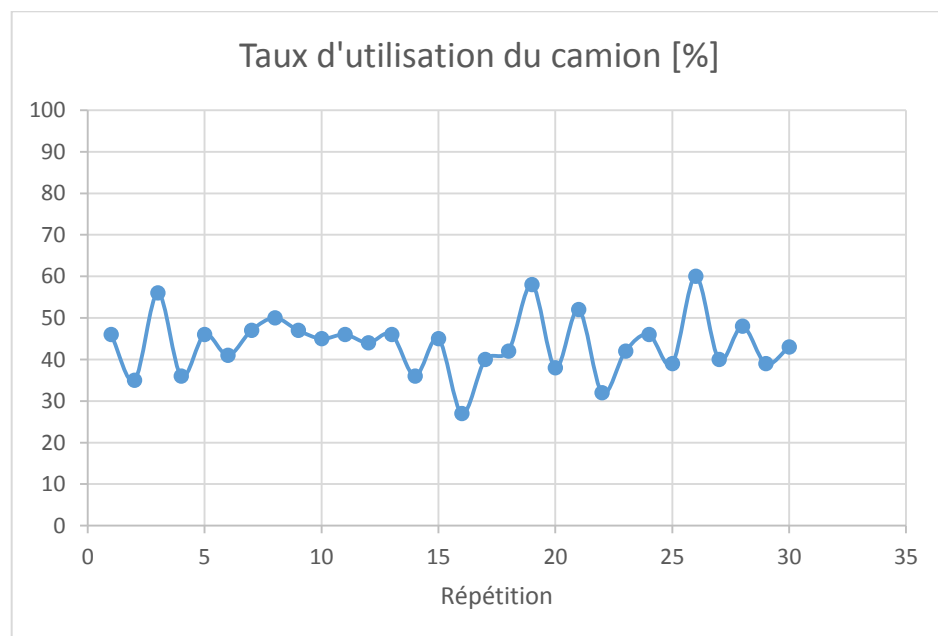


Figure 5.35: Taux d'utilisation du camion dans la stratégie 6

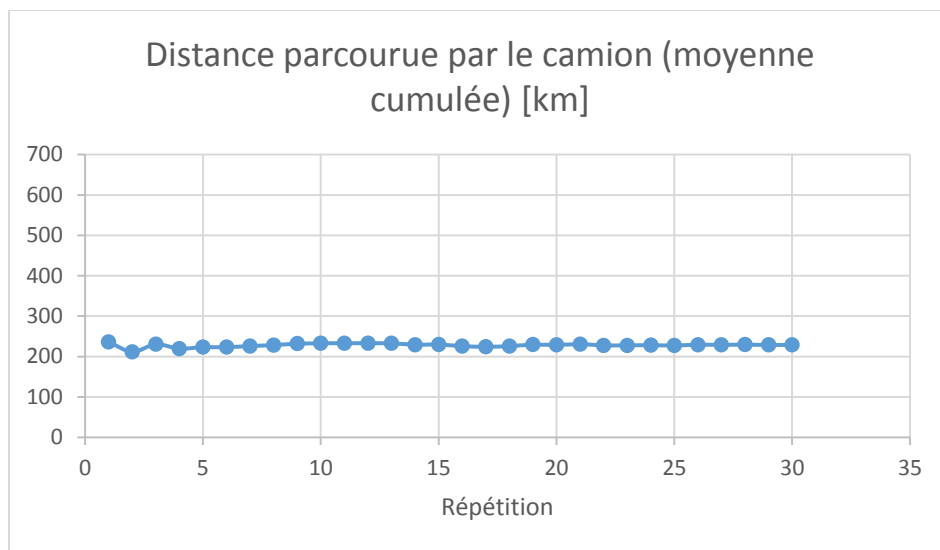


Figure 5.36: Distance parcourue par le camion dans la stratégie 6 (moyenne cumulée)

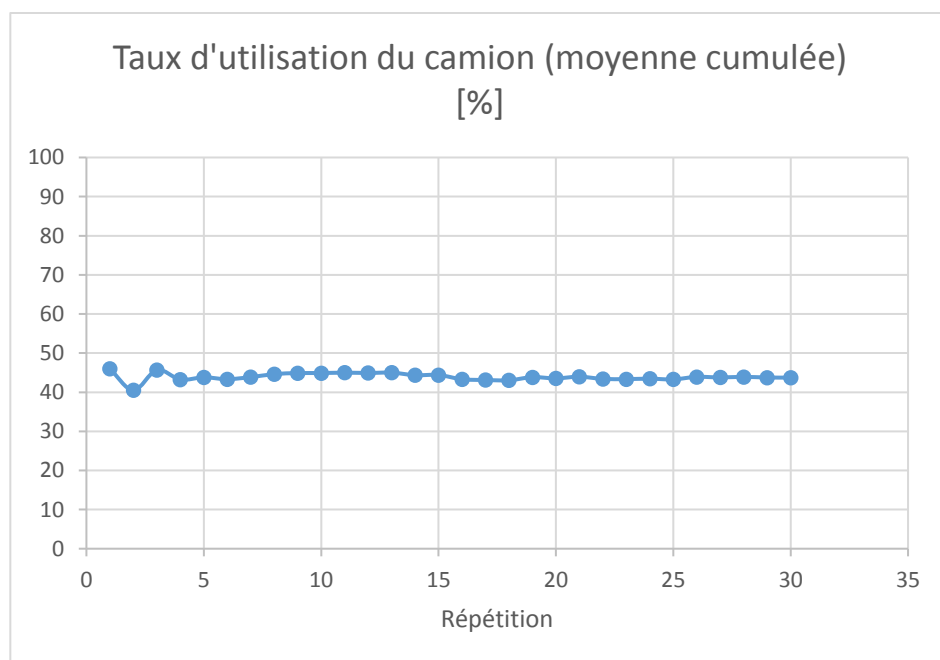


Figure 5.37: Taux d'utilisation du camion dans la stratégie 6 (moyenne cumulée)

Nous observons que dans la stratégie 6, le camion de collecte des déchets parcourt une distance moyenne de 229 km par semaine, avec un taux d'utilisation de 43 %. Cette dernière valeur est très similaire à celle qui est obtenue dans la stratégie 1 (non hybride). La même chose ne se produit pas avec la distance parcourue, ce qui est bien inférieur à celle obtenue dans la stratégie 1. Cela montre les avantages et les inconvénients de la combinaison de stratégies.

5.7.4 Stratégie 7

Cette stratégie est similaire à la stratégie 5. Il s'agit d'un hybride entre la stratégie 1 et la stratégie 3. Cependant, à la fois les petits et moyens terminaux suivent l'approche de pilotage de S1 et les grands suivent l'approche de pilotage de S3. Les figures suivantes montrent les résultats obtenus :

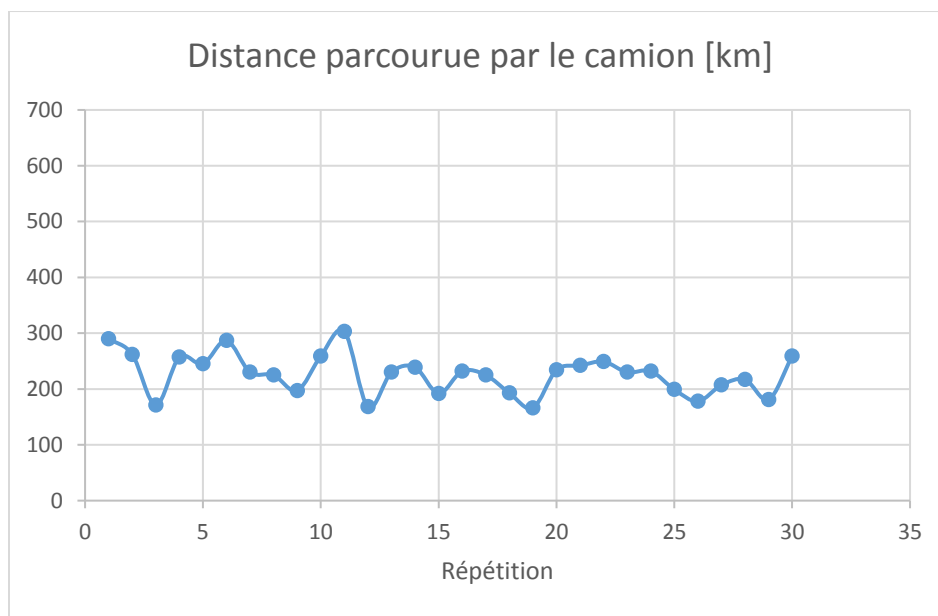


Figure 5.38: Distance parcourue par le camion dans la stratégie 7

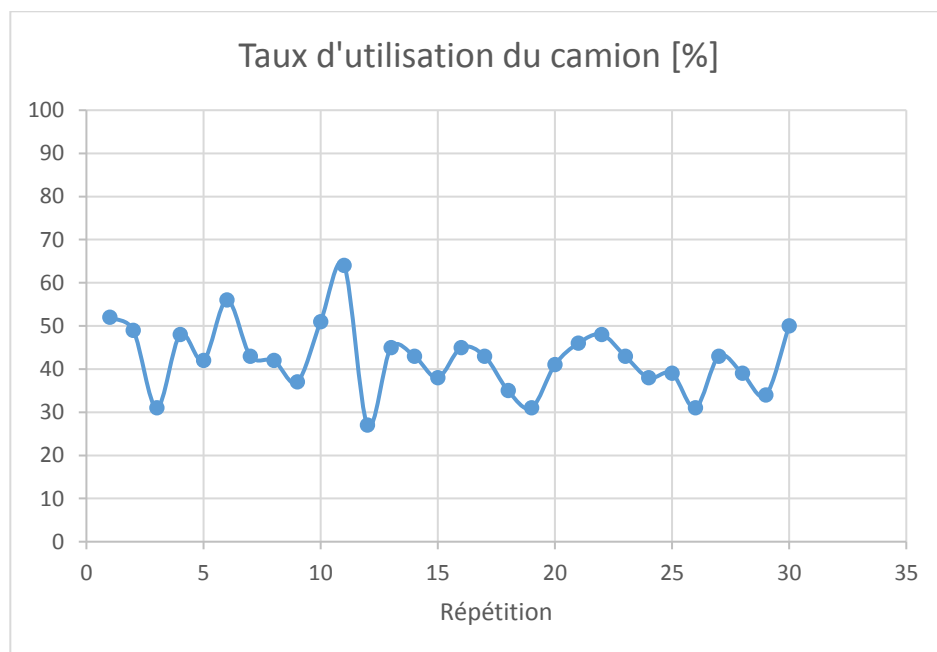


Figure 5.39: Taux d'utilisation du camion dans la stratégie 7

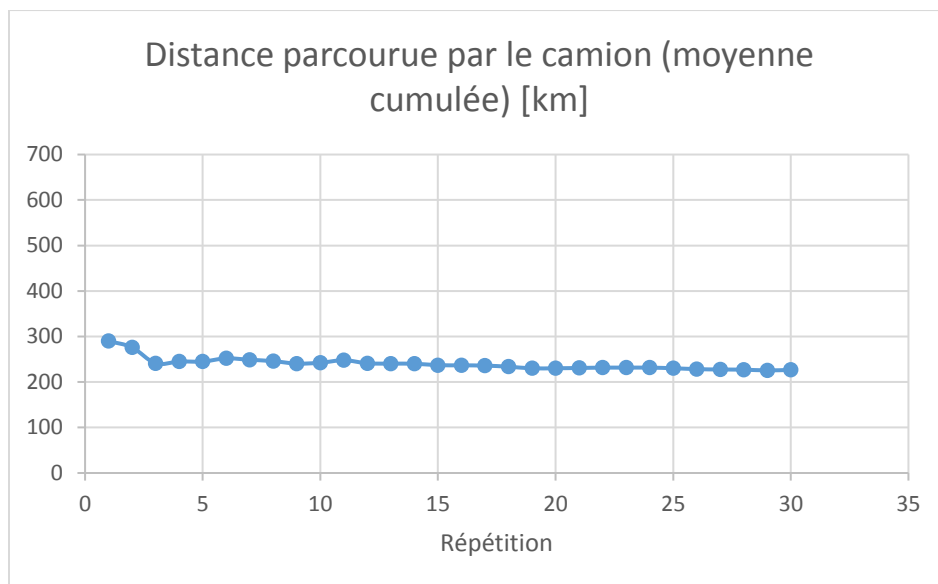


Figure 5.40: Distance parcourue par le camion dans la stratégie 7 (moyenne cumulée)

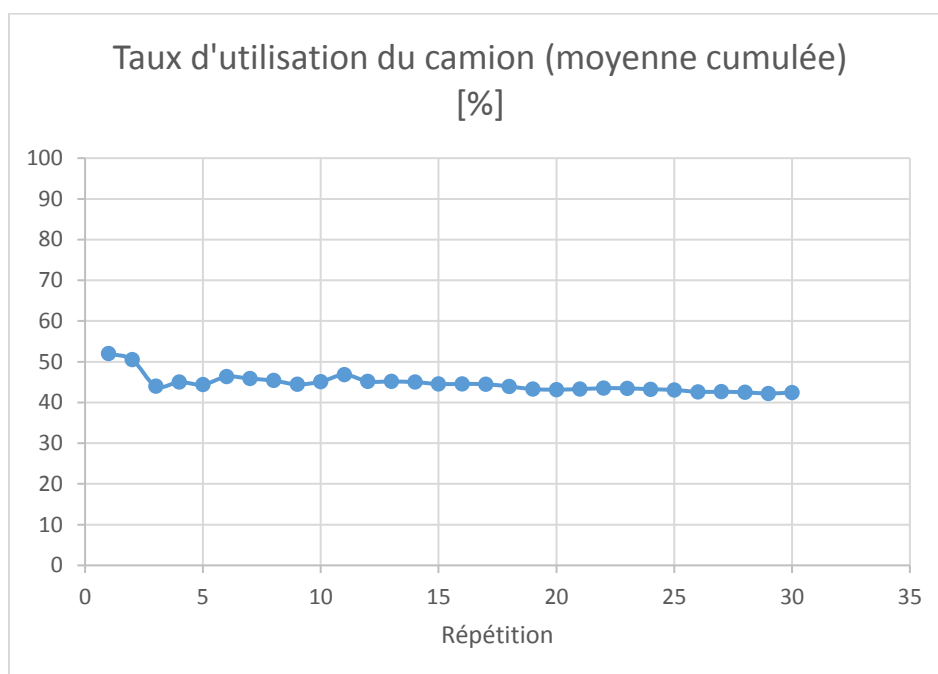


Figure 5.41: Taux d'utilisation du camion dans la stratégie 7 (moyenne cumulée)

Nous observons cette fois que dans la stratégie 7, le camion de collecte des déchets parcourt une distance moyenne de 226 km par semaine, avec un taux d'utilisation de 42 %. Cela suggère encore une fois que le degré de déploiement a plus d'influence sur le système que la stratégie choisie pour exécuter la stratégie hybride.

5.7.5 Synthèse de la troisième série d'expériences

Dans cette troisième série d'expériences, nous avons réalisé l'étude de deux implantations progressives (partielles) de stratégies de collecte de déchets. Il y a d'une part la progression constituée des stratégies 1, 2, 4 et 6. Et d'autre part, celle des stratégies 1, 3, 5 et 7.

Les deux implantations progressives commencent dans la stratégie 1 et se terminent par une stratégie hybride, dont une partie significative des terminaux est gérée par la stratégie 1 (dans les stratégies 6 et 7, le 86 % des terminaux fonctionnent dans le cadre de la stratégie 1). Ceci est représenté dans les deux figures suivantes.

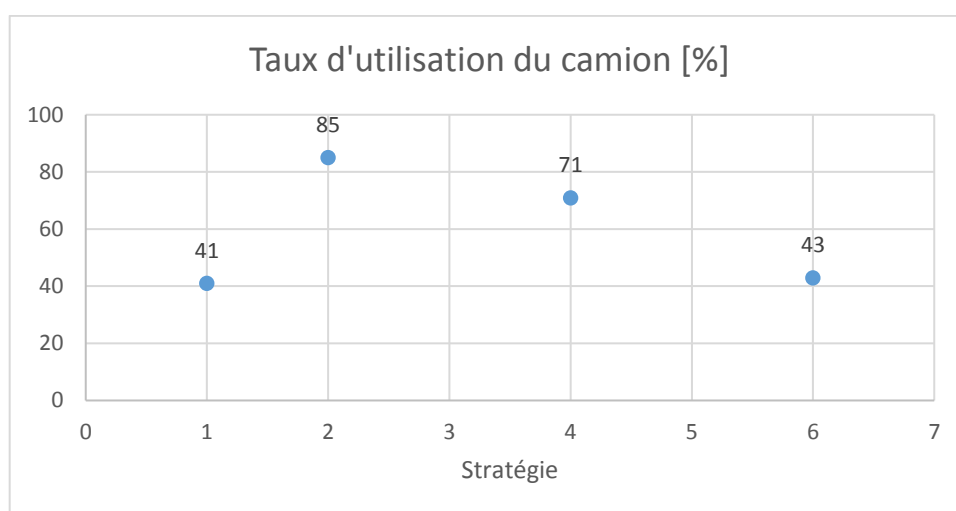


Figure 5.42: Taux d'utilisation du camion dans les stratégies 1, 2, 4 et 6

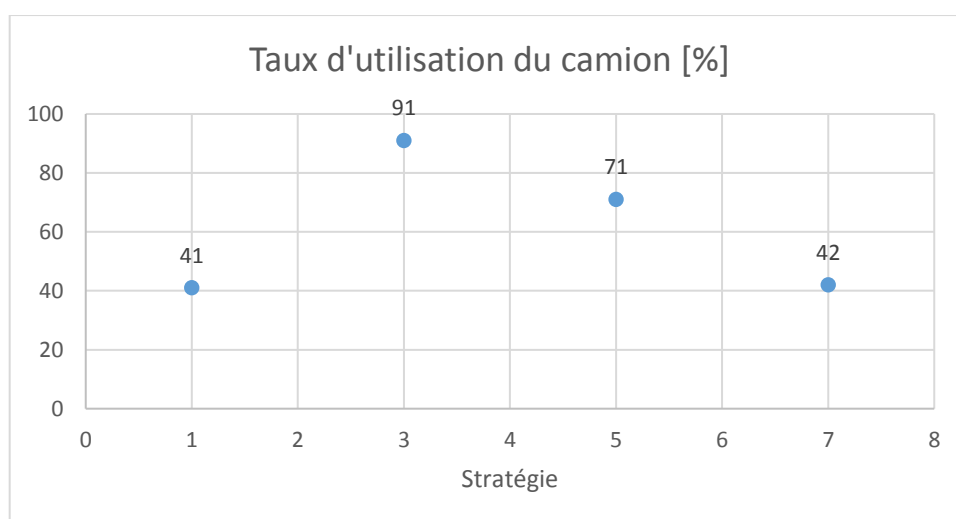


Figure 5.43: Taux d'utilisation du camion dans les stratégies 1, 3, 5 et 7

Sur la base de cette série d'expériences, et en tenant compte des résultats obtenus en termes de distance parcourue et de taux d'occupation du camion, nous concluons de façon préliminaire que les stratégies 6 et 7 semblent être les plus bénéfiques pour le port de Montréal. Elles nécessitent moins de distance parcourue et de moins de temps de camionnage pour compléter une semaine de collecte. Une analyse globale et complète est nécessaire pour valider en détail une telle analyse. Cependant, la tâche est plus complexe. Nous abordons cette discussion dans le prochain chapitre.

CHAPITRE 6 RÉSULTATS ET DISCUSSION

Tout au long de ce travail, le système logistique de collecte des déchets dans le port de Montréal a fait l'objet d'une étude approfondie. Des informations pertinentes ont été collectées concernant, entre autres, les rôles des travailleurs impliqués, les horaires de travail et le fonctionnement de la collecte des déchets.

L'un des principaux problèmes rencontrés concerne la nécessité d'avoir un chauffeur disponible 24 h sur 24 pour faire la collecte lorsque les bateaux arrivent au port. Cela implique notamment une utilisation inefficace du camion, comme indiqué dans les résultats de la stratégie 1.

Grâce à l'utilisation de technologies modernes dans les conteneurs et les camions, et notamment la mesure automatique du poids des déchets dans ces derniers, des stratégies nouvelles de collecte ont été proposées pour améliorer la performance du système, réduisant ainsi les coûts associés. Les deux principales économies de coûts obtenues sont les suivantes :

1. Passage de trois quarts de travail pour le conducteur de camion (stratégie 1) à un quart de travail (stratégies 2 et 3).
2. Passage de nombreuses heures de travail consacrées au triage (stratégie 1) à 0 heure de travail consacrée au triage (stratégies 2 et 3).

Toutes les stratégies élaborées ont leurs avantages et leurs inconvénients. Le tableau suivant présente les résultats de la performance de chaque stratégie.

Tableau 6.1: Synthèse des résultats

<u>stratégie</u>	<u>distance parcourue [km]</u>	<u>taux d'utilisation [%]</u>
1	407	41
2	500	85
3	260	91
4	302	71
5	296	71
6	229	43
7	226	42

Premièrement, dans les stratégies non hybrides (1, 2 et 3), nous considérons que le taux d'utilisation de la stratégie 3 est trop élevé et celui de la stratégie 1 est trop faible. Rappelons que les conditions de trafic routier et la maintenance des véhicules n'ont pas été prises en compte pour cette étude, donc le fait que le camion passe 91 % du temps consacré à des tâches productives peut poser un problème logistique, qui pourrait entraîner une augmentation rapide du nombre de plaintes pour retards de service, voire même des terminaux non visités. Dans le même sens, n'occuper le camion que 41 % est un coût financier évitable.

Du point de vue du kilométrage effectué, il ne fait aucun doute que la stratégie 3 est la plus attrayante, car elle présente un avantage considérable par rapport aux stratégies 1 et 2, qui ont un kilométrage assez similaire.

Compte tenu de tout cela, nous recommandons de façon préliminaire la mise en œuvre de la stratégie 2 par rapport aux autres stratégies non hybrides. Cependant, la validation d'une telle stratégie nécessite une étude approfondie.

Deuxièmement, dans les stratégies hybrides, nous observons clairement que le résultat obtenu dépend plus de la configuration des terminaux que des stratégies choisies. Les stratégies 4 et 5 ont la même configuration et génèrent des résultats très similaires, tout comme les stratégies 6 et 7 avec leur configuration.

Nous voulons éviter une comparaison directe entre les stratégies hybrides et non hybrides, car différents facteurs à prendre en compte entreraient en jeu (par exemple les heures dédiées au triage et le transport improductif de déchets), pas seulement la distance parcourue et le taux d'utilisation. En incorporant S1 dans les stratégies 2 et 3 afin de simuler une implantation progressive de ces dernières, tous ses inconvénients sont également incorporés.

Cela dit, nous voyons qu'une configuration avec de petits et moyens terminaux utilisant la stratégie 1 et le reste utilisant la stratégie 2 ou 3 (S6 et S7) présente de meilleurs résultats que les autres configurations, puisque dans S4 et S5 la distance à parcourir et le taux d'utilisation sont plus élevés, donc une collecte peut être faite avec moins de ressources.

CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Nous avons effectué une étude préliminaire du processus logistique de la collecte des déchets dans le port de Montréal. En particulier, nous avons étudié différentes manières de réaliser ce processus selon différents scénarios réalistes. Chacune de ces stratégies a ses avantages et ses inconvénients. Le problème abordé était notamment celui des coûts excessifs des ressources et la mauvaise utilisation de ces dernières.

L'approche utilisée dans cette étude présente certaines faiblesses, qui devraient être renforcées par les chercheurs qui poursuivront ces travaux :

- Plusieurs hypothèses simplificatrices dans le modèle de simulation (diversité limitée des types de déchets, diversité limitée des centres de revalorisation et traitement, routes de collecte sans trafic, véhicules sans entretien) devraient être éliminées.
- Peu de données réelles ont été utilisées (nous ne disposons pas d'informations sur le caractère saisonnier de la demande de services de collecte, la localisation réelle des centres d'accueil n'est pas connue). Il faudrait utiliser plus de données afin de créer un modèle de simulation plus précis.
- Procédures de définition des routes de collecte sont simples et limitées. De nouvelles procédures de définitions des routes pourraient être adaptées à partir de l'état de l'art et testées directement dans la simulation.

En ce qui concerne la mise en œuvre des stratégies, certains aspects n'ont pas été approfondis non plus. Par exemple, la faisabilité d'utiliser le type de technologie proposé, notamment pendant l'hiver canadien, devrait être étudiée, ainsi que les problèmes potentiels d'alimentation en énergie de ces capteurs. De plus, il faudrait préciser le nombre et la localisation des conteneurs, en recherchant notamment un compromis entre coût et efficacité, puisque les conteneurs représentent un investissement significatif d'un tel projet.

Ainsi, ce travail d'analyse préliminaire pourrait aussi être poussé davantage en utilisant des données plus détaillées. Notamment, avec un modèle de simulation plus précis et détaillé, un plus grand nombre de scénarios spécifiques, par exemple incluant le nombre et la localisation des conteneurs, mais aussi des scénarios plus précis de génération de déchets, pourraient être testés.

De la même manière, l'influence de l'utilisation de compacteurs et d'incinérateurs à bord de navires pourrait aussi être étudiée.

En conclusion, sur la base des analyses et des études effectuées, cette étude préliminaire recommande d'approfondir l'étude de l'implémentation de la stratégie 2, étant donné qu'elle présente une utilisation judicieuse des ressources, un kilométrage raisonnable, aucun besoin de triage, ni aucun transport improductif de déchets.

BIBLIOGRAPHIE

- Allain, A. (2007). *Déchets internationaux sur les navires*. Agence canadienne d'inspection des aliments.
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2018). *Situación de la gestión de residuos sólidos en América Latina y el Caribe*. Bogotá: BID.
- Beza, P. (2014). Ship Waste Management in the Port of Igoumenitsa. *Research Gate*.
- Bonilla, D. (2019). *En el país circulan 120 millones de plásticos y solo el 2 % se recicla*. Santo Domingo: El Dia.
- CE Delft. (2017). *The Management of Ship-Generated Waste On-board Ships*. CHEW.
- Elder, A., Hirohiko, S., Yutaka, A., & Keiichi, Y. (2016). Food Weight Estimation using Smartphone and Cutlery. *IoT of Health*.
- Fruth, M. (2017). Digitization in maritime logistics—What is there and what is missing? *Cogent Business & Management*.
- Gadaev, A. (2018, 08 30). *WiseTech Global*. Récupéré sur Site Web WiseTech Global: <http://www.wisetechglobal.com>
- Galli, E. (2013, 01 08). *Sobre la gestión de los residuos en los buques*. (La nación) Récupéré sur Site Web La nación: <https://www.lanacion.com.ar/1543657-sobre-la-gestion-de-residuos-de-los-buques>
- Gaudreau. (2019, Mars 4). Conteneur à chargement avant. Santo Domingo, République Dominicaine.
- Gaustad, F. (2012). *Waste Management Plan for Ports in Grenland*. Grenland Havn.
- Gendreau, M., Guertin, F., Potvin, J.-Y., & Taillard, É. (1999). Parallel Tabu Search for Real-Time Vehicle Routing and Dispatching. *Transportation Science*.
- Goran, R., Miomir, J., & Miodrag, A. (2016). Experience with an On-board Weighing. *ETRI Journal*.
- Government Consulting Services. (2010). *Vessel Waste, Literature Review*. Canada, Public Works and Government Services.

- Greenpeace Argentina. (2019, Mars 3). *Basura Cero*. Récupéré sur Site Web Greenpeace Org.: <https://www.greenpeace.org/archive-argentina/es/campanas/contaminacion/basura-cero/>
- Grupo de Investigación de Economía Ecológica. (2016, 04 14). *La basura: consecuencias ambientales y desafíos*. Récupéré sur Universidad Nacional de Mar del Plata: <https://eco.mdp.edu.ar/institucional/eco-enlaces/1611-la-basura-consecuencias->
- IMO. (2018, Décembre 13). *Prevention of Pollution by Garbage from Ships*. (International Maritime Organization) Récupéré sur Site Web IMO Org.: <http://www.imo.org/en/ourwork/environment/pollutionprevention/garbage/pages/default.aspx>
- Jaccoud, C., & Magrini, A. (2014). Regulation of solid waste management at Brazilian ports: Analysis and proposals for Brazil in light of the European experience. *Science Direct*.
- Kim, B.-I., Kim, S., & Surya, S. (2005). Waste collection vehicle routing problem with time windows. *Science Direct*.
- Komanduri, R., & Satish, B. (2007). Container Integrity and Condition Monitoring using RF Vibration. *IEEE*.
- Pereira, S., Fontana, C., Fontana, C., & Sakurai, C. (2014). Management of Port Solid Waste Framework. *International Journal of Energy and Environment*.
- Planética. (2018, Décembre 18). *Información sobre ecología, cuidado y protección del medio ambiente*. Récupéré sur Site web Planetica Org.: www.planetica.org
- Port de Montréal. (2017). *Navires 2017*. Montréal.
- Public Domain Pictures. (2019, Mars 4). Contenedor de residuos verdes. Santo Domingo, République Dominicaine.
- Pxhere. (2017). Malaysia Flag Bulk Carrier Type.
- Sheffield, H. (2016). *Sweden's recycling is so revolutionary, the country has run out of rubbish*. London: www.independent.co.uk.
- Taboada-González, P. (2009). La tecnología de plasma y residuos sólidos. *Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal*.

- Weihong, M., Jinwei, F., & ZhaoHuarui, W. (2019). The Realization of Pig Intelligent Feeding Equipment and Network Service Platform. *Springer Link*.
- Weintrit, A., & Neumann, T. (2013). Container Transport. Dans *Maritime Transport & Shipping* (pp. 195-200). Gdynia: CRC Press.
- Yepes, A. (2006). *Gestión de residuos sólidos en puertos y terminales marítimos: su manejo en la Sociedad Portuaria Regional de Cartagena (SPRC)*. Cartagena: www.revistas.udistrital.edu.co.
- Yu, C. (2002, 08 07). *Measuring the inside state of an airtight container using an optic fiber color sensor*. Spie Digital Library. Consulté le 12 2018, 13, sur www.spiedigitallibrary.org

ANNEXE A – ESTIMATION DE LA GÉNÉRATION DES DÉCHETS (GOVERNMENT CONSULTING SERVICES, 2010)

Tableau A.1: Estimation de la génération des déchets

<u>Type de déchet</u>	<u>Quantité de déchets générés</u>
Déchets solides	3 kg par jour par personne
Compostage	12 m ³ par navire par semaine
Bouteilles	2 par jour par personne
Déchets dangereux	860.23 kg par semaine

ANNEXE B – RÉSULTATS MODÈLE DE SIMULATION

Tableau B.1: Résultats modèle de simulation

<u>SCÉNARIO</u>	<u>STRATÉGIE</u>	<u>TAUX D'ARRIVÉES ADDITIONNEL</u> [%]	<u>VOLUME ADDITIONNEL</u> [%]	<u>DISTANCE PARCOURUE PAR LE CAMION</u> [km]	<u>DISTANCE PARCOURU PAR LE DISTRIBUTEUR</u> [km]	<u>TAUX UTILISATION CAMION [%]</u>
1	1	0	0	407	50	41
1	1	0	10	352	44	43
1	1	0	25	328	44	40
1	1	0	50	332	59	40
2	1	0	0	378	76	46
2	1	0	10	353	69	45
2	1	0	25	370	76	46
2	1	0	50	402	108	51
1	1	10	0	365	42	45
2	1	10	0	381	73	48
2	1	25	0	432	76	54
1	1	25	0	414	46	52
1	1	50	0	438	62	58
2	1	50	0	458	94	60
1	2	0	0	500	-	85
1	2	0	10	491	-	85
2	2	0	0	491	-	82
1	2	0	25	487	-	84
1	2	0	50	508	-	85

Tableau B.1: Résultats modèle de simulation (suite et fin)

2	2	0	10	546	-	83
2	2	0	25	530	-	80
2	2	0	50	542	-	78
1	2	10	0	517	-	86
2	2	10	0	511	-	84
1	2	25	0	496	-	87
2	2	25	0	528	-	84
1	2	50	0	518	-	92
2	2	50	0	592	-	86
1	3	0	0	261	-	91
1	3	0	10	272	-	92
2	3	0	0	337	-	92
1	3	0	25	297	-	92
1	3	0	50	288	-	92
2	3	0	10	329	-	93
2	3	0	25	330	-	92
2	3	0	50	345	-	95
1	3	10	0	275	-	92
2	3	10	0	336	-	93
1	3	25	0	272	-	94
2	3	25	0	329	-	94
1	3	50	0	251	-	95
2	3	50	0	340	-	96