UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

CONTENEURISATION INTÉGRALE COMME UNE NOUVELLE APPROCHE DU TRANSPORT ROUTIER DANS L'INDUSTRIE DE LA VALORISATION DES MATIÈRES RÉSIDUELLES GÉNÉRÉES PAR LE SECTEUR CONSTRUCTION, RÉNOVATION, DÉMOLITION

MÉMOIRE PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA

MAÎTRISE EN INGÉNIERIE CONCENTRATION GÉNIE INDUSTRIEL

PAR

MILAD NOZARI

JUIN 2021

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

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

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

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

Ce mémoire a été dirigé par :

Jean-François Audy, **UQTR**
directeur de recherche, Ph. D., ing. f.

Pascal Forget, **UQTR**
codirecteur de recherche, Ph. D., ing.

Jury d'évaluation du mémoire :

Jean-François Audy, Ph. D., ing. f. **UQTR**

Chantal Baril, Ph. D., ing. **UQTR**

Luis Antonio De Santa-Eulalia, Ph. D. **Université de Sherbrooke**

DÉDICACE

À celle qui m'a donné la vie, qui s'est sacrifiée pour
mon bonheur et ma réussite, à ma mère.

À mon père, qui a veillé tout au long de ma vie
à m'encourager et à me donner l'aide.

À ma chère sœur Mandana que j'aime profondément.

REMERCIEMENTS

Cette maîtrise a pu être réalisée grâce au concours de plusieurs personnes à qui je souhaite témoigner ma reconnaissance.

Tout d'abord, je remercie chaudement M. Jean-François Audy qui, en qualité de directeur de recherche, a fait preuve d'une grande disponibilité, de soutien et de patience et a su me donner de nombreux conseils avisés tout au long de mon parcours.

Je remercie aussi M. Pascal Forget, co-directeur de cette maîtrise. Il a su me motiver et me conseiller lorsque j'en avais besoin. Malgré les embûches, il a toujours été présent pour moi et cela a fait une grande différence dans mon parcours.

Je tiens également à remercier Mme Amina Lamghari pour ses précieux conseils tout au long du projet.

Mes remerciements s'adressent aussi au personnel de la société Multi Recyclage comme cas d'étude dans le présent projet.

Je voudrais enfin remercier les membres du jury qui ont évalué mes travaux de recherche, soit Mme Chantal Baril et M. Luis Antonio De Santa-Eulalia.

RÉSUMÉ

L'urbanisation et la croissance démographique ont entraîné une augmentation significative de la quantité de matières résiduelles produites dans le monde. Une gestion impropre des matières résiduelles a conduit à une importante quantité de ces matières mise en décharge, ce qui a suscité de vives inquiétudes quant à leurs impacts négatifs sur l'environnement et les ressources naturelles. Un mécanisme approprié de recyclage des matières résiduelles en tant qu'action corrective préserve les ressources naturelles de l'épuisement, car une partie significative des matières résiduelles sont mises en décharge en raison des coûts élevés des opérations de transport et manutention dans la chaîne logistique de la valorisation des matières résiduelles L'objectif de ce mémoire est d'analyser, par le recours à la simulation à événements discrets, l'impact de la mise en œuvre de la conteneurisation intégrale au niveau des coûts, du temps d'attente des camions dans les files d'attente, du temps de passage des camions, de la consommation de carburant et des émissions des gaz à effet de serre (GES). Les processus de manutention et l'espace requis aux centres de transbordement sont identifiés comme les goulots qui mènent notamment à la création de files d'attente. Les résultats de cette recherche suggèrent que le transport des matières par l'utilisation d'une conteneurisation intégrale des sites d'origine des matières à un site de traitement (destination) entraîne l'atténuation de ces goulots et une réduction significative du temps d'attente total. De plus, les résultats montrent que le recours aux camions ayant le système de levage à crochet pour la manutention des conteneurs plutôt qu'aux camions qui utilisent le système de levage à treuil hydraulique facilite la conteneurisation intégrale et diminue la durée des opérations.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1
1.1 Contexte de la recherche 1
1.2 Objectif de la recherche 4
1.3 Structure du mémoire 6
CHAPITRE 2 RECENSION DES ÉCRITS 7
2.1 Gestion des matières résiduelles du secteur CRD 7
2.2 Réduction des temps d'attente des camions dans les files d'attente 10
2.3 Conteneurisation 15
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE 18
3.1 Collecte et analyse des données 19
3.1.1 Identification du cas à l'étude 19
3.1.2 Spécifications des véhicules et des équipements de manutention 20
3.1.3 Séquence des processus et flux de matières 27
3.1.4 Chronométrage des opérations 34
3.1.5 Taux d'arrivée des camions 35
3.1.6 Ajustement des distributions aux données collectées 38
3.2 Conception du modèle de simulation 40
3.2.1 Entités du modèle 41
3.2.2 Déplacement et trajectoires 41
3.3 Implantation du modèle dans le logiciel de simulation 47
3.3.1 Génération des instances aléatoires 52
3.3.2 Période de réchauffement 56
3.3.3 Indicateurs de performance du modèle de simulation 57
3.3.4 Paramètres en intrant du modèle de simulation 62
3.3.5 Vérification et validation du modèle de simulation 66
3.4 Conception du plan d'expérience 68
CHAPITRE 4 COMPARAISON DES DEUX SYSTÈMES LOGISTIQUES 71
4.1 Résultats en termes du temps moyen d'attente 71

4.2 Résultats en termes du temps moyen de passage 72
4.3 Résultats en termes des aspects financiers 73
4.4 Résultats en termes de la consommation de carburant 74
4.5 Résultats en termes des émissions de GES 75
4.6 Comparaison générale des deux scénarios 76
CHAPITRE 5 ANALYSE DE RÉSULTATS 78
5.1 Résultats de la simulation des scénarios 78
5.2 Nombre optimal des camions de service et CTR 90
5.3 Scénarios de transition vers l'approche alternative 92
CHAPITRE 6 CONCLUSION 97
6.1 Synthèse de la recherche 97
6.2 Limitations de la recherche 98
6.3 Contributions de la recherche et retombées pratiques 99
6.4 Avenues futures en recherche 99
6.5 Conclusion finale 100
RÉFÉRENCES 101

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Études de la littérature 13
Tableau 3.1 Nombre de camions observés aux entrées 36
Tableau 3.2 Taux d'arrivée des camions par heure au CT1 36
Tableau 3.3 Taux d'arrivée des camions par heure au CT2 36
Tableau 3.4 Taux d'arrivée des camions par heure à l'usine de tri et de traitement 37
Tableau 3.5 Temps moyen d'attente selon les données collectées 37
Tableau 3.6 Temps moyen de passage selon les données collectées 37
Tableau 3.7 Temps d'arrivée de CRPM aux centres de transbordements 38
Tableau 3.8 Distributions statistiques associées au temps des opérations 39
Tableau 3.9 Exemple d'une liste de tâches en transport 51
Tableau 3.10 Taux de consommation de carburant selon les équipements de transport . 58
Tableau 3.11 Facteurs d'émission selon le combustible de diesel 61
Tableau 3.12 Potentiel de réchauffement planétaire des gaz à effet de serre 61
Tableau 3.13 Résumé des paramètres intrants pour les deux approches logistiques simulées 65
Tableau 3.14 Nombre de camions internes arrivées dans l'observation et simulation 66
Tableau 3.15 Résultats de test T au niveau de taux d'arrivée et temps d'attente 67
Tableau 3.16 Résultats de test T au niveau de temps moyen de passage 67
Tableau 3.17 Plan d'expérience 70
Tableau 5.1 Comparaison de scénarios en traitant le même volume des matières résiduelles 81
Tableau 5.2 Comparaison de scénarios en traitant le même volume des matières résiduelles 82
Tableau 5.3 Comparaison de scénarios en traitant tous les conteneurs 87
Tableau 5.4 Comparaison de scénarios par verge cube des matières traitées 88
Tableau 5.5 Temps moyen d'attente aux divers scénarios de transition 93
Tableau 5.6 Temps moyen de passage aux scénarios de transition 95
Tableau 5.7 Coût total et émissions de GES pour les scénarios de transition 95

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Chaîne logistique dans l'industrie CRD 3
Figure 3.1 Phases de la méthodologie employée 18
Figure 3.2 Divisions géographiques des sites de client et de l'entreprise partenaire 20
Figure 3.3 Conteneur de type « *Roll-off* » 22
Figure 3.4 Camion de levage de type « *Roll-off* » 22
Figure 3.5 Camion avec une remorque à plancher mobile (CRPM) 23
Figure 3.6 Dimensions de la boîte d'un CRPM 23
Figure 3.7 Procédure de chargement/déchargement d'un conteneur par un camion de type « *Hook-lift* » 24
Figure 3.8 Camion de type « *Hook-lift* » 25
Figure 3.9 Remorque de type « Hook-lift » d'un conteneur 26
Figure 3.10 Camion train routier de type « Hook-lift » avec une remorque et trois conteneurs (https://www.facebook.com/MultiRecyclage) 26
Figure 3.11 Équipements de manutention à un site de l'entreprise 27
Figure 3.12 Flux de véhicules dans l'approche actuelle 28
Figure 3.13 Séquences des opérations aux centres de transbordement 30
Figure 3.14 Séquences des opérations à l'usine de tri et de traitement 31
Figure 3.15 Flux de véhicules dans l'approche logistique alternative proposée 32
Figure 3.16 Flux des opérations aux centres de transbordement selon l'approche logistique alternative proposée 33
Figure 3.17 Flux des matières et véhicules à l'usine de tri et de traitement de l'approche logistique proposée 34
Figure 3.18 Organigramme du modèle de simulation 45
Figure 3.19 Organigramme du modèle de simulation au niveau des centres de transbordement 46
Figure 3.20 Organigramme du modèle de simulation au niveau de l'usine de tri et de traitement 48
Figure 3.21 Modèle implanté au site d'un client 49
Figure 3.22 Modèle implanté au centre de transbordement 50
Figure 3.23 Modèle implanté à l'usine de tri et de traitement 50
Figure 3.24 Pseudo-codes du modèle de simulation 53
Figure 3.25 Format de la matrice des clients 54
Figure 3.26 Format de la matrice du type de tâches 54
Figure 3.27 Format de la matrice de l'ordre des tâches 55
Figure 3.28 Taux d'arrivée des camions externes au niveau d'achalandage moyen 64
Figure 3.29 Taux d'arrivée des camions externes au niveau d'achalandage fort 64
Figure 3.30 Diverses vues de l'animation du modèle de simulation 68
Figure 3.31 Paramètres variés au cours de la simulation des divers scénarios 69

Figure 4.1 Résultats au niveau du temps moyen d'attente dans les files 72
Figure 4.2 Résultats au niveau du temps moyen de passage des camions 73
Figure 4.3 Comparaison des coûts d'utilisation des équipements pour les deux scénarios 74
Figure 4.4 Comparaison de la consommation de carburantdes équipements pour les deux scénarios 75
Figure 4.5 Comparaison des émissions de GES 76
Figure 4.6 Comparaison des indicateurs de performance des deux scénarios, en pourcentage 77
Figure 5.1 Volume des matières transportées aux divers scénarios 80
Figure 5.2 Temps moyen d'attente dans la file de l'UTT 83
Figure 5.3 Temps moyen de passage des camions externes 84
Figure 5.4 Comparaison du coût total des 24 premiers scénarios 85
Figure 5.5 Comparaison des émissions totales des 24 premiers scénarios 85
Figure 5.6 Comparaison du makespan des 24 premiers scénarios 86
Figure 5.7 Comparaison de coût total par verge cube des matières 89
Figure 5.8 Comparaison de la consommation de carburant par verge cube des matières 90
Figure 5.9 Nombre de conteneurs dans la zone d'échange de l'usine de tri et de traitement pendant la journée 91
Figure 5.10 Nombre de conteneurs dans les zones d'échange de CT1 et CT2 pendant la journée selon le nombre de CTR 92
Figure 5.11 Temps moyen d'attente aux scénarios de transition 94
Figure 5.12 Réduction du temps d'attente et du coût total au cours de 10 années 96

LISTE DES ÉQUATIONS

Équation 1. Calcul d'émission de CO_2 59
Équation 2. Calcul d'émission de CH_4 ou N_2O 59
Équation 3. Quantité totale des émissions de GES en CO_2 équivalent 60

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

BCC : Bulk cargo containerization

CR : Centre de répartition

CRD : Construction, rénovation, démolition

CRPM : Camion avec remorque à plancher mobile

CT : Centre de transbordement

CT1 : Centre de transbordement numéro 1

CT2 : Centre de transbordement numéro 2

CTR : Camion train routier

GES : Gaz à effet de serre

SAM : System assessment models

SEM : System engineering models

UTT : Usine de tri et de traitement

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Contexte de la recherche

Les matières résiduelles générées par les activités de construction, de rénovation et de démolition, communément appelées CRD, sont l'un des flux de matières résiduelles solides les plus importants au monde, avec un volume annuel mondial de plus de 10 milliards de tonnes (Wu et al., 2019). Ce flux de matières contient généralement du bois, du métal, du verre, de la pierre, des gravats, ainsi que d'autres matériaux. Bien que plus de 50% de ces matériaux puissent être recyclés, la mise en décharge reste la pratique courante, principalement parce que les coûts de recyclage sont plus élevés que les coûts de mise en décharge (Ulubeyli et al., 2017). Par exemple, au Québec, plus de 60% du bois produit par les activités de CRD est enfoui (Société québécoise de récupération et de recyclage (Recyc-Québec), 2012). Si l'on considère les débris de tout genre, près de 1,5 million de tonnes sont enfouies chaque année libérant non seulement une tonne et demie de gaz à effet de serre (GES) par tonne enfouie, mais aussi éliminant toute possibilité de réemploi des matériaux (St-Germain, 2013). En 2015, seulement près de 1,8 million de tonnes de matières résiduelles ont pu être détournées des lieux d'enfouissement grâce aux opérations de récupération et de valorisation d'une cinquantaine de centres québécois de tri des résidus de CRD (Recyc-Québec, 2019).

Les activités de collecte, manutention et transport des matières résiduelles de CRD depuis les sites de clients (sources en matières résiduelles de CRD) jusqu'à l'usine de tri et de traitement ont un rôle clé dans l'industrie de valorisation de ces matières, car la majorité du temps, un investissement important en main-d'œuvre et en coûts variés est lié à cette étape du processus de récupération et valorisation. Puisque c'est l'entreprise de recyclage qui fournit les conteneurs aux clients, les opérations de manutention commencent aux sites des clients. Ces sites clients sont généralement des endroits où ont lieu des activités de démolition, de construction ou de rénovation. La planification et l'ordonnancement des

opérations de cette chaîne sont particulièrement cruciaux, car le manque de conteneurs aux sites des clients peut retarder les activités des clients et entraîner des coûts supplémentaires pour ces derniers.

En général, une chaîne logistique dans le secteur des CRD consiste en trois types d'installation : un centre de répartition, plusieurs centres de transbordement et une usine de tri et de traitement. C'est au centre de répartition (CR) que les commandes de clients sont reçues et les répartiteurs sont en contact avec les chauffeurs des camions afin de les diriger et les informer de la prochaine tâche et destination. Un centre de transbordement (CT) est un lieu qui permet de transférer les chargements des camions de collecte dans des boîtes de camions dont la capacité est plus élevée que celle des camions de collecte, afin de limiter les déplacements des camions de collecte entre les sites de clients et l'usine de tri et de traitement (UTT). C'est à ce dernier endroit que les matières sont triées par du personnel et des équipements spécialisés, pour recycler une partie des matières et acheminer l'autre partie à un site d'enfouissement.

Les entreprises de recyclage possèdent généralement une flotte de camions, ci-après dénommés « camions internes ». Ces camions assurent le transport des conteneurs vides du centre de répartition ou des centres de transbordement aux sites de clients, ainsi que le transport des conteneurs pleins des sites de clients aux centres de transbordement ou à l'usine de tri et de traitement. Ils commencent et terminent leurs quarts de travail du centre de répartition. En plus des camions internes, on retrouve aussi généralement des camions qui n'appartiennent pas à l'entreprise de recyclage. Ces camions dénommés ci-après « camions externes », assurent également le transport des matières à recycler aux centres de transbordement ou à l'usine de tri et de traitement. Par conséquent, leur arrivée est hors du contrôle des répartiteurs de l'entreprise. Pour transporter les matières résiduelles déchargées par les camions internes et externes des centres de transbordement à l'usine de tri et de traitement, des camions avec remorque à plancher mobile (CRPM) sont utilisés. Les arrivées des CRPM sont définies en fonction d'un horaire prédéterminé. La Figure 1.1 est une représentation résumée des activités de transport et de manutention pour

l'approvisionnement d'une entreprise de recyclage dans l'industrie de la valorisation des matières résiduelles de CRD.

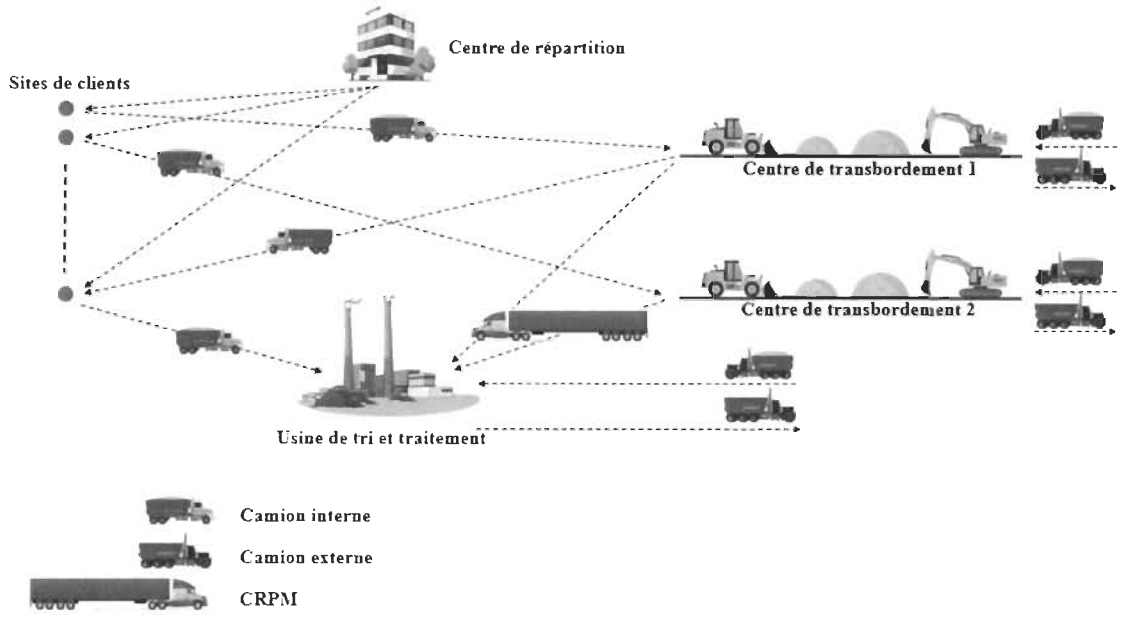


Figure 1.1 Chaîne logistique dans l'industrie CRD

En général, les centres de transbordement et l'usine de tri et de traitement ont des capacités d'accueil fixes et la quantité des ressources, y compris la main-d'œuvre, les espaces et équipements de manutention sont limités. En outre, puisque l'arrivée des camions ne se répartit pas uniformément au fil du temps, des files d'attente se créent très souvent à des heures de pointe spécifiques, ce qui met en attente les véhicules de transport et limite la capacité de service. La création d'une file d'attente aux entrées des centres de transbordement et de l'usine de tri et de traitement par lesquelles les camions (internes, externes et CRPM) doivent passer entraîne des coûts d'opération significatifs année après année. Dans une telle situation, la réduction du temps d'attente des camions aux files peut conduire à la réduction des coûts, de la consommation de carburant et des émissions de gaz à effet de serre et ce sera l'objet principal de ce mémoire.

1.2 Objectif de la recherche

Le problème des temps d'attente et les coûts significatifs associés pose un défi à une entreprise de recyclage de matières CRD dans la région métropolitaine de Montréal. L'ampleur de ce défi s'accroit au vu de l'augmentation des activités de l'entreprise. Le responsable en recherche et développement désire mesurer et évaluer l'impact de la mise en œuvre d'une nouvelle approche en logistique d'approvisionnement sur les temps d'attente aux entrées des sites de l'entreprise, les coûts de transport, la consommation de carburant et les impacts environnementaux en découlant. Cette nouvelle approche repose sur une conteneurisation intégrale du flux de matériel des sites générateurs de matières CRD (origines) au site de traitement (destination). Spécifiquement, elle se distingue de l'approche actuelle par deux caractéristiques principales :

- Éviter les opérations sous-jacentes à un transbordement lors du transport des matières CRD des clients aux centres de transbordement puis à l'usine de tri et de traitement;
- Échanger un conteneur plein contre un conteneur vide lors de l'arrivée du camion interne au centre de transbordement ou à l'usine de tri et de traitement.

Elle implique les deux changements suivants au système logistique de l'entreprise :

i) Le recours à une flotte de camions internes avec un système de levage à crochet (*hook lift*) des conteneurs en remplacement des camions avec un système de levage des conteneurs à treuil hydraulique à câble (*Roll-off*) présentement utilisés;

ii) Le recours à des camions trains routiers (CTR) de type « *Hook-lift* » en remplacement des CRPM pour le transport du matériel du centre de transbordement à l'usine de tri et de traitement.

Pour tester cette nouvelle approche logistique, ce mémoire propose une approche quantitative basée sur la simulation à événements discrets. Le système logistique de l'entreprise est ainsi modélisé par un modèle de simulation à événements discrets. En explorant des scénarios, le système logistique actuel et celui proposé sont comparés et la

sensibilité du système logistique aux divers paramètres est évaluée. Dans ce modèle, la mise en place de la nouvelle approche logistique est évaluée selon les indicateurs de performance suivants :

1. les coûts des activités de transport et manutention ;
2. le temps d'attente des camions dans les files d'attente aux entrées des installations de la chaîne logistique ;
3. le temps de passage des camions aux installations de la chaîne logistique ;
4. la consommation de carburant ;
5. les émissions de GES.

L'étude de simulation présentée dans ce mémoire se base sur les hypothèses suivantes :

I. Aucune panne des ressources : la fiabilité de système est considérée 100% et il n'existe aucune probabilité de panne de ressources.

II. Aucune pause des ressources : les ressources fonctionnent sans cesse pendant le quart de travail et aucune période de maintenance préventive pour les équipements ou aucun temps de repos pour les ressources humaines n'est envisagé.

III. Toutes les matières sont de même type : on considère toutes les matières recyclées du même type. En pratique, le contenu des conteneurs des clients peut varier selon le type de matières résiduelles de CRD, comme le gypse, le béton, etc.

IV. Il n'existe qu'un seul type de conteneur : l'entreprise du cas d'étude possède des conteneurs en diverses capacités (10, 15, 20, 30, 40 et 60 verges cubes) mais plus de 75% des commandes des clients sont exécutées avec les conteneurs de 40 verges. C'est donc ce type prédominant qui est considéré dans ce mémoire. Ceci étant dit, l'impact de la capacité des conteneurs a été évalué en définissant plusieurs scénarios dans lesquels la capacité des conteneurs utilisés est de 20 verges.

1.3 Structure du mémoire

Ce mémoire est structuré en cinq chapitres distincts. Outre le premier chapitre présentant le contexte, les objectifs et les hypothèses de recherche, le second chapitre présente une revue de littérature divisée en trois parties, soit la gestion des matières résiduelles du secteur CRD, la réduction des temps d'attente des camions dans les files d'attente et la conteneurisation. Par la suite, la présentation du cas d'étude, la collecte des données historiques, les processus des opérations, la méthodologie employée et le plan d'expérience sont présentés au troisième chapitre. Le quatrième chapitre présente une comparaison de l'approche logistique actuelle et celle proposée par évaluation des résultats de la simulation de diverses mesures de performance. Le cinquième chapitre propose une analyse et une discussion des résultats de la simulation des scénarios du plan d'expérience et une stratégie de transition de l'état actuel de l'entreprise à l'état proposé. Enfin, une conclusion présente les contributions scientifiques et retombées pratiques de ce projet ainsi que des avenues futures en recherche.

CHAPITRE 2 RECENSION DES ÉCRITS

Le problème abordé dans le cadre des présents travaux se trouve à l'intersection de trois différents domaines. De ce fait, dans la section de la recension des écrits, chacun de ces trois domaines est présenté au sein d'une sous-section. Premièrement, un aperçu des études menées dans le domaine de la gestion des matières résiduelles CRD est donné. Deuxièmement, des articles portant sur la réduction du temps d'attente dans les files d'attente en améliorant l'efficacité des opérations de transport ou de manutention sont étudiés. Troisièmement, le concept de conteneurisation est abordé.

2.1 Gestion des matières résiduelles du secteur CRD

Les avantages de l'utilisation de déchets de CRD recyclés ne se limitent pas seulement à la construction d'installations telles que les trottoirs, les routes, la base des terrains de sport et de murs antibruit (Fatemi et Imaninasab, 2016), mais également d'éviter d'extraire une matière première vierge de préserver l'espace d'enfouissement, d'atténuer le besoin de nouvelles décharges et les coûts supplémentaires (Li et Du, 2015 ; Pickin et al., 2018 ; Shahmansouri et al., 2020a) . L'enfouissement des déchets de CRD a entraîné des impacts négatifs sur l'environnement tels que la pollution et la dégradation des sols, la pollution de l'air et de l'eau, les émissions de gaz à effet de serre, le réchauffement climatique et de graves problèmes de santé (Epstein, 2018 ; Kabirifar et al., 2020 ; Shahmansouri et al., 2019). C'est la raison pour laquelle les solutions opérationnelles en termes des flux de matières des projets de construction vers les installations de recyclage des déchets CRD ne réduit pas seulement les coûts associés aux véhicules de collecte des déchets CRD tels que le carburant, mais a également un impact sur l'atténuation de la pollution environnementale ainsi que la réduction de la congestion du trafic dans les zones urbaines (Wang et al., 2017).

Dans une recherche menée par (Wu et al., 2020) en Australie, la complexité de la mobilité interrégionale des déchets de CRD, ainsi que les rôles des itinéraires et du transport dans

la gestion des déchets de CRD ont été étudiés en termes d'impacts économiques, impacts environnementaux et impacts sociaux. De la même manière, Chileshe et al (2018) ont quantifié les effets de facteurs connus sur la logistique inverse dans les activités commerciales de construction et de démolition. Ils ont identifié les éléments d'action ayant le plus grand potentiel pour améliorer positivement les résultats de la logistique inverse. Ces moteurs de la logistique inverse ont été classés en trois groupes de forces économiques, environnementales et sociales. Ils ont développé un modèle conceptuel et l'ont testé par rapport aux réponses d'un questionnaire auprès de 49 répondants experts actifs dans l'industrie de la construction en Australie du Sud. Il en ressort que les moteurs économiques ont eu le plus d'impact alors que les moteurs sociaux n'ont eu presque aucun impact significatif.

Selon Ma et al (2020), environ 75% des villes chinoises sont encore entourées d'importants volumes de déchets de CRD. Dans leur recherche, afin d'identifier les défis dans le développement de la gestion des déchets de CRD, 10 usines de recyclage dans 10 villes chinoises ont été étudiées. Ils ont interviewé 25 praticiens de l'industrie pour examiner les défis. Au final, huit défis sont identifiés : (1) un approvisionnement instable de déchets de CRD pour le recyclage, (2) l'absence de subventions pour les activités de recyclage et le coût élevé pour l'utilisation des terres, (3) l'attention insuffisante accordée à la conception des produits pour la minimisation des déchets, (4) l'absence de réglementation sur le tri sur place, (5) les activités de décharge non réglementées, (6) un manque de coordination entre les différents départements de l'administration gouvernementale, (7) un manque d'estimation précise de la quantité et de la distribution des déchets, et (8) un manque d'un système efficace de traçabilité des déchets.

La planification de la collecte des déchets de CRD est de nature complexe. De plus, trouver les solutions les plus fiables dans un court délai dans la planification de la collecte des déchets de CRD est un enjeu très important et des techniques innovantes ont été largement utilisées dans les problèmes d'ingénierie pour modéliser l'état de système logistique et trouver une solution dans un temps raisonnable (Mirmozaffari et al., 2020 ;

Shahmansouri et al., 2020b, 2021). Plusieurs articles portent sur la gestion des matières CRD. Asefi et al. (2020) classent les modèles proposés dans la littérature en deux catégories principales : les modèles d'évaluation de système (SAM – System Assessment Models) et les modèles d'ingénierie de système (SEM – System Engineering Models). Les modèles d'évaluation des systèmes analysent principalement les systèmes de gestion des déchets, l'analyse des flux de matières, les techniques d'évaluation des risques et l'analyse du cycle de vie. Les modèles d'ingénierie de système impliquent quant à eux la conception d'un système de gestion des déchets et comprennent la prise de décision multicritère, la dynamique du système, la prévision et les modèles basés sur les statistiques, les approches basées sur la simulation, l'analyse coûts-avantages et des modèles d'optimisation (Asefi et al., 2020). L'étude proposée dans ce mémoire fait partie de la deuxième catégorie, soit les modèles d'ingénierie de système.

Beliën et al. (2012) ont effectué une revue des études sur le problème de la collecte et de la gestion des déchets solides municipaux. Cette étude a examiné la classification des types de déchets (ordures, bennes à ordures / conteneurs, matières dangereuses, matières recyclables et autres), la portée des recherches (étude de cas, installation, allocation des camions et acheminement de la collecte), les méthodes de résolution (programmation mathématique, métaheuristique, heuristique, et autres méthodes), la nature du problème (stochastique ou déterministe) et la nature de l'objectif (nombre de camions, coûts, impacts environnementaux, nombre d'employés, longueur de l'itinéraire, temps de collecte et autres facteurs). La plupart des articles présentés par ces auteurs se concentrent sur la proposition de différentes méthodes mathématiques de calcul et d'analyse des modèles auxquels plusieurs problèmes tels que les problèmes d'acheminement des véhicules dans la chaîne d'approvisionnement des matériaux CRD sont considérés. Par contre, le nombre d'articles axés sur l'optimisation du temps d'attente aux entrées des sites de collecte ou de recyclage est très faible tandis que la réduction de temps d'attente aux entrées de divers types de l'entreprise est un sujet intéressant parmi les chercheurs dans le domaine de la gestion des opérations, car cela entraîne généralement à une réduction des coûts, du temps de passage, de la consommation de carburant et de émissions des gaz à effet de serre.

Autrement dit, puisque le temps d'attente significatif dans les files d'entrée des entreprises est une cause de divers défis, il apparaît très pertinent de consentir des efforts à l'écourter. L'objectif de ce mémoire est de proposer un nouveau système logistique afin de réduire le temps d'attente aux entrées des sites d'une entreprise dans l'industrie de recyclage des matières CRD et d'évaluer l'impact de la réduction de temps d'attente sur les paramètres de coût, de temps de passage, de consommation de carburant et d'émissions de GES.

2.2 Réduction des temps d'attente des camions dans les files d'attente

Les études qui examinent les temps d'attente des camions dans les files d'attente se situent plutôt dans le contexte des terminaux intermodaux, tels que les ports maritimes, les entrepôts de transbordement ou les terminaux rail-route. Il existe toutefois des études qui concernent les chaînes d'approvisionnement en boucle fermée ou les files d'attente aux entrées d'une entreprise manufacturière.

Zhao et Goodchild (2010) ont utilisé la simulation pour évaluer l'impact d'une mise à jour en temps réel du nombre de groupes de camions et du nombre des conteneurs sur la réduction du travail de manutention débouchant sur l'augmentation de gain économique. Zhao et Goodchild (2013) ont utilisé une approche hybride combinant la simulation et la théorie des files d'attente pour réduire les temps de manutention des conteneurs et de traitement des camions. Une simulation a été développée dans Matlab en utilisant le système de file d'attente M/G/1 et une heuristique de différence révisée pour modéliser le processus de récupération des conteneurs dans une baie. En théorie des files d'attente, une file d'attente M/G/1 est un modèle de file d'attente où les arrivées sont Markoviennes (modulées par un processus de Poisson), les temps de service ont une distribution Générale et il y a un seul serveur. Ils évaluent l'impact du temps de séjour des conteneurs et du taux d'arrivée des camions sur la productivité des grues et l'impact du taux d'arrivée des camions et du taux de rendez-vous manqués sur le temps de passage des camions. Akpan et al. (2013) ont utilisé le modèle de file d'attente M / M / S pour estimer le temps d'interarrivée, le temps de passage et le temps d'attente des camions dans un site

d'enfouissement au Nigéria. En théorie des files d'attente, une file d'attente M/M/S est un modèle de file d'attente où les arrivées sont Markoviennes (modulées par un processus de Poisson), les temps de service ont une distribution exponentielle et il existe S serveurs. Dekker et al. (2013) ont proposé d'échanger les remorques pleines et vides pour éviter des manutentions supplémentaires de conteneurs dans les terminaux portuaires et ont étudié par simulation les effets de cette pratique d'échange sur le temps d'attente et l'environnement. Fleming et al. (2013) utilisent la simulation à base d'agents pour modéliser la porte d'entrée d'un port maritime afin de réduire le temps d'attente des camions dans les files d'attente. Les résultats indiquent que l'utilisation d'une file d'attente distribuée (c.-à-d., une file unique alimente de nombreuses guérites) réduit considérablement les temps d'attente moyens et la variabilité des temps d'attente. Dans la recherche de Lima et al. (2015), qui s'intéressent au contrôle des flux de transport des terminaux intermodaux, les auteurs ont couplé une simulation basée sur des agents et un modèle de théorie des files d'attente à travers un modèle de simulation représentant une chaîne logistique portuaire qui comprend des flux de transport, un terminal logistique intermodal et un terminal portuaire. Ils ont comparé deux approches actuelles avec leur approche proposée dans le cadre de trois scénarios. Dans le premier scénario, tout le transport est effectué en parcourant le chemin qui présente le plus court itinéraire sans égard à un trafic plus élevé. Dans le deuxième scénario, tout le transport est effectué en parcourant le chemin qui présente un itinéraire plus long mais un trafic plus faible. Dans le troisième scénario et qui est l'approche proposée, la sélection du chemin est effectuée sur la base d'une prévision du plus court temps d'itinéraire chez les véhicules disponibles pour effectuer un transport donné. Il a été observé que dans le troisième scénario, tous les coûts étaient inférieurs aux deux autres scénarios. Toujours dans le domaine portuaire, Zhang et al. (2019) ont utilisé un modèle de file d'attente de vacances pour décrire le processus de service coordonné des grues d'une cour d'un port maritime. Ce modèle décrit les processus de service avec des vacances, où les vacances sont une interruption de service temporaire. Les serveurs utilisent les vacances pour effectuer d'autres tâches afin d'augmenter l'utilisation. Sur la base de la théorie des files d'attente non stationnaires, les

temps d'attente des camions devant les portes et le temps d'attente pour les camions internes dans la cour sont estimés avec plus de précision et le plan de quota (le nombre maximum de camions accepté) est plus raisonnable.

Briesemeister et Novaes (2017) ont présenté un modèle théorique visant à déterminer le nombre de quais étant le plus compatible avec le nombre de camions reçus par jour pour minimiser le temps d'attente des camions dans un terminal de transbordement. Par rapport à leur étude de cas, les résultats de leur modèle ont déterminé le nombre optimal des quais au terminal et les résultats de la simulation ont validé l'efficacité de leur modèle mathématique proposé, de sorte qu'en ayant 23 quais, le temps d'attente des camions ainsi que les coûts des opérations sont optimaux. Mokshin et al.(2019) ont simulé les files d'attente dans un terminal de transbordement afin de minimiser les coûts totaux en réduisant le temps de passage et le temps d'attente des camions dans les files d'attente. Ils ont aussi optimisé le nombre de chariots automatisés, le nombre de places de déchargement / chargement et le nombre de camions arrivant par heure pour le déchargement / chargement.

Dans le domaine ferroviaire, R. Wang et al. (2018) ont étudié l'optimisation d'un réseau logistique complet (rail-route) par la programmation linéaire bi-objectif en variables mixtes via un algorithme génétique, visant à minimiser le temps maximum entre chaque paire origine-destination qui est la somme des temps de trajet nécessaires aux terminaux intermodaux. L. Wang et Zhu (2019) ont étudié la minimisation du temps de traitement total dans un terminal intermodal rail-route, aussi par l'utilisation d'algorithme génétique. Le tableau 2.1 résume les principaux travaux de recherche récents dans le domaine de la réduction des temps d'attente qui mène à la réduction du temps de passage, des opérations de manutention, du coût total, des émissions et de la consommation d'énergie des camions dans les files d'attente.

Tableau 2.1 Études de la littérature

N	Auteurs	Contexte	Méthode de résolution	Objectif(s)
1	Huynh (2009)	Port maritime	Simulation - GatePlanner	Réduire le temps de passage des camions
2	Zhao et Goodchild (2010)	Port maritime	Séparation et évaluation (B&B), MATLAB	Minimiser les opérations de manutention des conteneurs
3	Vahdani et al. (2012)	Chaîne d'approvisionnement en boucle fermée	Programmation multi-objectifs floue	Minimiser les coûts de transport
4	Akpan et al. (2013)	Gestion des déchets	Analyse stochastique	Minimiser le temps d'attente et le temps de passage des camions
5	Zhao et Goodchild (2013)	Port maritime	Simulation - MATLAB	Augmenter la productivité des opérations de manutention
6	Dekker et al. (2013)	Port maritime	Simulation - MATLAB	Augmenter la capacité de manutention
7	Fleming et al. (2013)	Port maritime	Simulation - Netlogo	Réduire le temps d'attente des camions
8	Chen, Govindan, et Golias (2013)	Port maritime	Algorithme génétique	Optimiser le taux d'arrivée et les émissions des camions
9	Chen, Govindan, et Yang (2013)	Port maritime	Algorithme génétique	Minimiser le coût total du système
10	Chen et Yang (2014)	Port maritime	Simulation - PARAMIC	Estimer la longueur de la file d'attente des camions
11	Zhang et al. (2019)	Terminal rail-route	Combinaisons également probables (CEP) - MATLAB	Minimiser les coûts
12	Lima et al. (2015)	Port maritime	Simulation - Simio	Réduire le temps d'attente et le temps de passage des camions

Tableau 2.1 Études de la littérature (suite)

13	Aziziankohan et al. (2017)	Chaîne d'approvisionnement en boucle fermée	Optimisation par LINGO	Minimiser la longueur de la file d'attente et les émissions
14	Briesemeister et Novaes (2017)	Terminal de transbordement	Simulation - Arena	Déterminer le nombre optimal de portes de quai
15	R. Wang et al. (2018)	Terminal rail-route	Programmation mixte en nombres entiers - C++	Minimiser les coûts
16	Shahram fard et Vahdani (2019)	Terminal de transbordement	Algorithme méta-heuristiques multi-objectifs	Minimiser les coûts et la consommation d'énergie
17	Mokshin et al. (2019)	Terminal de transbordement	Simulation - Anylogic	Réduire les coûts
18	L. Wang et Zhu (2019)	Terminal rail-route	Algorithmes génétiques	Minimiser du temps de manutention
19	Smith et Srinivas (2019)	Entreprise manufacturière	Simulation - Simio	Réduire le temps d'attente des camions
20	Zhang et al. (2019)	Port maritime	Méthode de B-PSFFA	Minimiser les coûts
21	Mohtashami et al. (2020)	Chaîne d'approvisionnement en boucle fermée	Programmation non-linéaire - GAMS	Réduire les impacts environnementaux et la consommation d'énergie

2.3 Conteneurisation

Le développement de la conteneurisation du fret en vrac (BCC – Bulk Cargo Containerization) a récemment attiré l'attention de plusieurs chercheurs (Matsuda et al., 2020). Kuznetsov et al. (2017) ont suggéré la conteneurisation des cargaisons en vrac dans les ports maritimes. En effet, il s'agit d'une méthode efficace pour le transport et la manutention des marchandises générales, car il a les avantages suivants :

- L'utilisation de conteneurs pour la manutention en vrac facilite la mobilité géographique des matières;
- La conteneurisation permet de réduire considérablement le problème de la génération de poussières pendant le transport, le stockage et la manutention des cargaisons en vrac;
- La conteneurisation permet de réduire le taux de dommage associé à la manutention portuaire des cargaisons fragiles en réduisant le nombre des opérations de manutention;
- La conteneurisation peut être effectuée en utilisant l'équipement de manutention existant;
- La conteneurisation est flexible et liquide, car contrairement à l'approche traditionnelle de manutention en vrac, une diminution des trafics des cargaisons en vrac ne nécessiterait pas la démolition d'installations coûteuses et permettrait à la flotte de conteneurs d'être utilisée dans d'autres applications;
- Le stockage de la cargaison pourrait être organisé en fonction des types et marques, facilitant ainsi la procédure de mélange.

De leur côté, Matsuda et al. (2020) ont proposé la conteneurisation des cargaisons en vrac, car elle peut corriger les déséquilibres dans la quantité de cargaison transportée entre les liaisons principales et de retour, améliorant ainsi l'efficacité de transport. Ils ont également identifié les facteurs clés dans le choix des modes de transport. Ils ont classifié ces facteurs en deux catégories : les facteurs du côté du prestataire de services de transport et les

facteurs du côté des expéditeurs (clients). Les facteurs du côté du prestataire sont le coût de transport, les dommages au conteneur, le déséquilibre commercial, le poids de la cargaison, l'achat de conteneurs, la connaissance des articles/installations, la crédibilité du destinataire, les lois et règlements. Les facteurs du côté des clients sont le coût de transport, le coût d'inventaire, coût de la procédure administrative, les surestaries, les caractéristiques des marchandises, le délai, la fréquence et ponctualité, les taux de change, le vol et d'autres facteurs mineurs. Leur étude vise à identifier les pistes de réduction de coûts susceptibles d'augmenter l'utilisation de la conteneurisation des marchandises en vrac. Clott et al. (2015), pour leur part, ont évalué l'impact et les défis de l'augmentation des mouvements de produits agricoles conteneurisés de la campagne vers les marchés étrangers, en termes d'opérations et de gouvernance. Ils ont examiné plusieurs problèmes opérationnels majeurs, actions, règles et politiques affectant le flux conteneurisé et son coût total. Rodrigue et Notteboom (2014) ont étudié le gain du secteur agricole et de ses chaînes de produits en termes de rapidité, d'ubiquité et de flexibilité de la distribution de fret conteneurisé. Ils ont également discuté de la manière dont la conteneurisation facilite la gestion des expéditions de fret individuelles. Aussi, Lirn et Wong (2012) ont étudié les facteurs influençant le choix du mode de transport entre vraquiers et conteneurs. Par exemple, ils ont identifié le coût de transport, le coût de manutention en entrepôt, le coût de manutention en transit, le surcoût selon la différence des prix sur le marché du fret (le prix de la cargaison à destination varie en fonction de la qualité et l'heure de son arrivée), la facilité de contrôle de la qualité des cargaisons, le taux de dommage du fret, la taille du lot de fret, la capacité de suivi des cargaisons, la durée du temps de transit, la facilité de ramassage de la cargaison et le calendrier d'expédition ponctuel. De plus, pour comprendre le comportement dictant le choix du transport de fret des expéditeurs et importateurs de céréales, ils ont utilisé une enquête par questionnaire et une technique basée sur un processus de hiérarchie analytique (PHA) floue pour déterminer le niveau de l'importance qu'ils attachent aux critères de service. Le « coût total » s'est avéré être la dimension de service la plus importante influençant le comportement dictant le choix du transport de cette marchandise.

Le concept de conteneurisation dans le domaine du transport peut être divisé en conteneurisation dite « partielle » ou « intégrale ». Dans la conteneurisation partielle, une partie du transport des marchandises est effectuée par conteneurs, tandis que dans la conteneurisation intégrale, les marchandises sont transportées de l'origine à la destination dans le même conteneur. Malgré qu'il existe des travaux de recherche sur la conteneurisation intégrale des matières en vrac dans divers domaines, au meilleur de notre connaissance, il n'existe pas de travaux dans la littérature qui considèrent la conteneurisation intégrale dans le domaine de l'industrie de la gestion des déchets CRD. Ce mémoire vise à combler en partie cette lacune. La conteneurisation intégrale comme nouvelle approche logistique pour réduire les coûts est analysée, notamment par la réduction des temps d'attente des camions dans les files d'attente de plusieurs sites d'une entreprise de valorisation des déchets CRD.

Les variables indépendantes identifiées sont la capacité des conteneurs, la règle de répartition des camions internes, le niveau d'achalandage des camions externes et le type de système logistique appliqué. Les variables dépendantes identifiées sont le temps d'attente des camions dans les files, le temps de passage des camions à travers les sites de l'entreprise, les coûts de transport et manutention, la consommation de carburant, les émissions de GES et la durée d'exécution des tâches de transport (makespan).

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE

La méthodologie utilisée pour mener cette étude implique le développement d'un modèle de simulation à événements discrets afin de reproduire les activités de transport d'une entreprise de recyclage et d'utiliser ce modèle pour comparer différentes alternatives dans la mise en place du système logistique proposé en comparaison avec le système logistique actuel. Une description de chaque étape de la méthodologie employée est ensuite réalisée. La figure 3.1 présente les phases de la méthodologie employée.

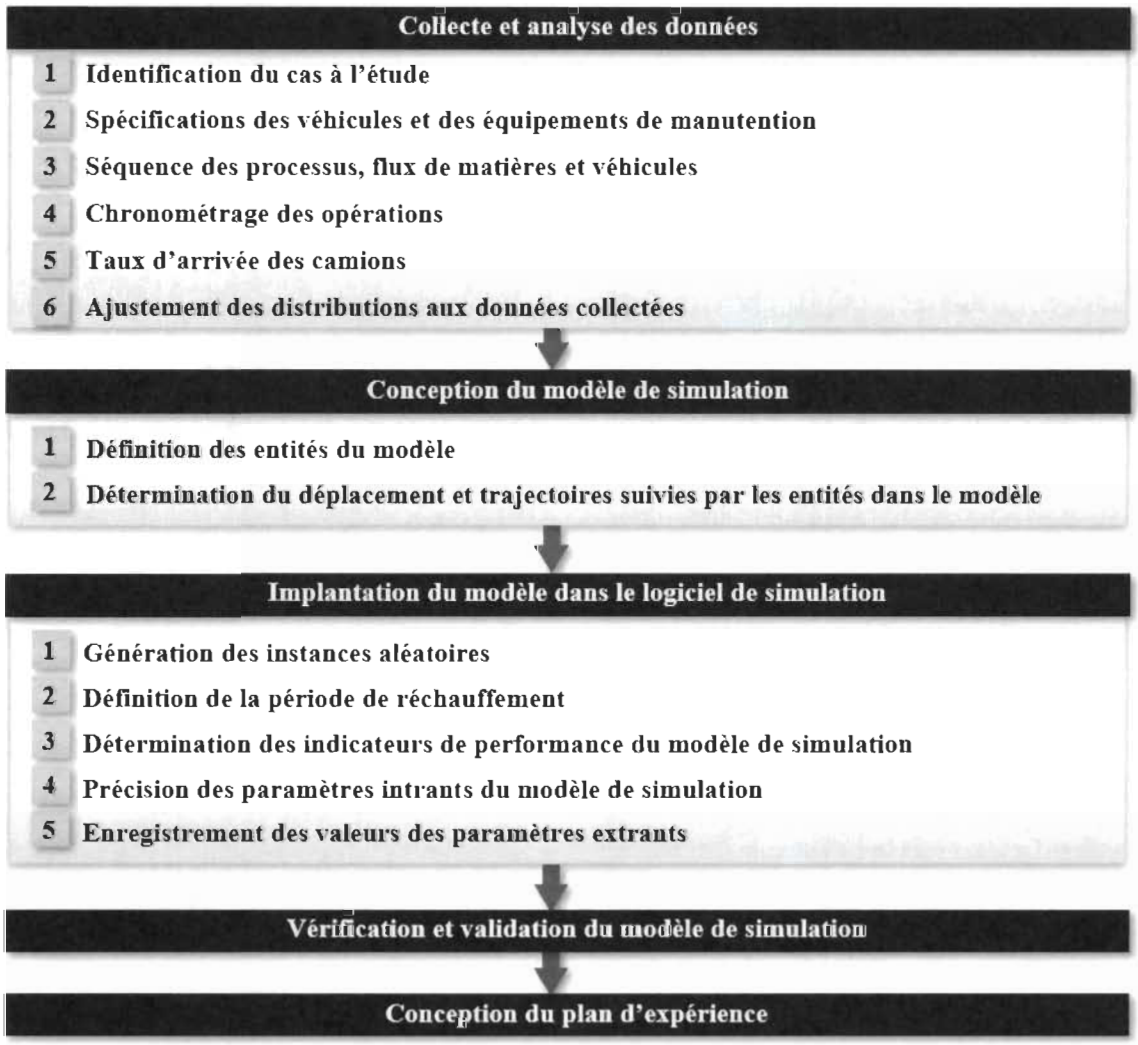


Figure 3.1 Phases de la méthodologie employée

3.1 Collecte et analyse des données

Pour mener à un modèle de simulation représentatif de la réalité, différents paramètres devaient être ajustés dans le développement de modèle en fonction des données collectées via diverses sources telles qu'un logiciel de géolocalisation des camions de la flotte de l'entreprise, le cahier d'enregistrement des balances de pesage des camions sur les sites de l'entreprise et les informations collectées auprès des employés. Puisque peu d'information était disponible concernant, entre autres, les processus utilisés, le taux d'arrivée des camions, les temps de chargement/déchargement et de pesage à la balance, il a été nécessaire de mesurer et collecter des données directement sur le terrain durant une journée d'observation des activités de l'entreprise de recyclage identifiée comme cas d'étude pour les travaux. Ensuite, les spécifications des véhicules et des équipements de manutention ont été identifiées en conduisant diverses réunions avec les responsables de l'entreprise. Les données collectées sont divisées en cinq catégories, soit :

1- Identification du cas à l'étude;

2- Spécifications des véhicules et des équipements de manutention ;

3- Séquence des processus, flux de matières et véhicules ;

4- Chronométrage des opérations ;

5- Taux d'arrivée des camions.

3.1.1 Identification du cas à l'étude

L'entreprise Multi-Recyclage S.D., fondée en 1993, est une entreprise spécialisée en location de conteneurs aux entrepreneurs ainsi qu'aux particuliers principalement dans les régions de Montréal, de Laval, des Hautes-Laurentides, des Basses-Laurentides et sur la Rive-Sud de Montréal. Cette entreprise privée offre à ses clients un service clé en main de gestion intégrée des matières résiduelles, dans les secteurs résidentiels, commerciaux et industriels. De plus, elle offre des services de vente et location d'équipements lourds ainsi que de récupération et de recyclage de matériaux y compris du bois et les matières

ligneuses, béton, plastiques, agrégats et déchets. L'entreprise emploie plus de 150 personnes et possède plus de 1300 conteneurs de différents types en termes de volume et de matériel à transporter. La région couverte par l'ensemble de clients est divisée en trois territoires, soit le territoire 1 qui couvre le centre et le sud de l'île de Montréal et la rive sud de Montréal, le territoire 2 qui inclut la rive nord de Montréal et Laval, et le territoire 3 couvrant la région des Laurentides. L'entreprise possède un centre de répartition (CR), deux centres de transbordement, soit le centre de transbordement 1 (CT1) et le centre de transbordement 2 (CT2) et une usine de tri et de traitement (UTT). Les conteneurs pleins des clients qui se situent dans le territoire 1 sont transportés au CT1 et ceux de clients de territoire 2 sont transportés à l'UTT, alors que ceux des clients du territoire 3 sont transportés au CT2. Selon les données collectées et celles fournies par les répartiteurs durant la journée étudiée, la trentaine de camions internes ont réalisé 60 tâches de clients situés dans les trois territoires géographiques. La figure 3.2 représente la division de ces territoires et des sites de clients et de l'entreprise.

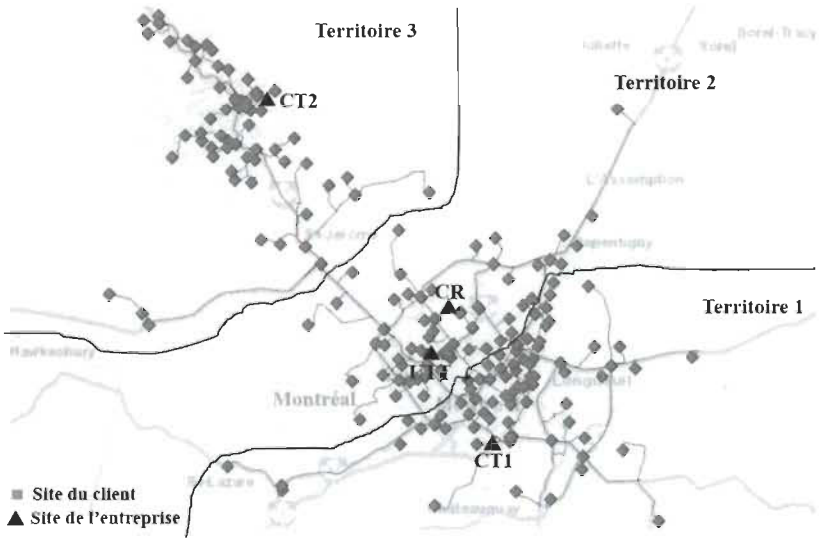


Figure 3.2 Divisions géographiques des sites de client et de l'entreprise partenaire

3.1.2 Spécifications des véhicules et des équipements de manutention

Pour obtenir les spécifications des véhicules et des équipements de manutention, quatre réunions de deux heures ont eu lieu avec le directeur du département de recherche et

développement de l'entreprise et le chef des répartiteurs. Les réunions ont permis de démystifier le système logistique actuel et celui proposé.

3.1.2.1 Système logistique actuel

Comme précédemment introduit, le système logistique actuel consiste en des sites de clients, un centre de répartition, plusieurs centres de transbordement et une usine de tri et de traitement. Les flux de matières circulent entre les installations par les camions internes et externes ainsi que les CRPM. Les opérations de manutention dans ce type de la chaîne logistique commencent par fournir des conteneurs vides aux clients et cela soulève certains enjeux opérationnels. Les opérations en juste à temps de l'approvisionnement des conteneurs vides aux clients ainsi que celles de la récupération des conteneurs pleins des sites de clients jouent un rôle significatif dans la satisfaction et la loyauté des clients.

En Amérique du Nord, un conteneur de type « *Roll-off* » est une benne à ordures rectangulaire et généralement ouverte (sans toit) avec des roues pour faciliter sa mise en place. Le conteneur est conçu pour être transporté par des véhicules avec un équipement de levage de type « *Roll-off* ». Ce type de conteneur est installé sur le camion porteur ou sur une semi-remorque à l'aide d'un câble qui le tire sur un support inclinable. Les véhicules conçus pour transporter les conteneurs de type « *Roll-off* » peuvent transporter des conteneurs de différents volumes et sont couramment utilisés pour contenir des charges de déchets de construction et de démolition, dont la plupart ont une porte battante à l'extrémité pour faciliter le déchargement. Les conteneurs de type « *Roll-off* » sont utilisés pour toutes sortes de travaux de construction, de rénovation, de démolition, de toiture, de terrassement ou de ménage. Ils sont aussi bien utilisés par les compagnies de construction que par tous les types d'entreprises et clients résidentiels. Au niveau des dimensions, la majorité des conteneurs de l'entreprise Multi-recyclage est connus sous le nom de conteneur quarante verges et ont une dimension de 20'x7'x8', pour un volume total de 1120 pieds carrés. C'est la raison pour laquelle le volume de tous les conteneurs de ce mémoire est supposé être de 1120 pieds carrés, équivalent à 40 verges cubes. De plus, pour faciliter les calculs de volume des matières, l'unité équivalente du volume (EQV)

d'un conteneur quarante verges est utilisée. La figure 3.3 représente un conteneur de type « *Roll-off* ».

Figure 3.3 Conteneur de type « *Roll-off* »

(https://www.multirecyclage.com/location-de-conteneur-particuliers-residentiel-demolition-renovation-laval-montreal-laurentides.html)

Les camions de collecte ayant le système de levage à câble utilisent un treuil et un câble pour tirer les conteneurs sur le châssis du camion. Les conteneurs de type « *Roll-off* » ont un crochet à l'avant pour s'accrocher au câble. Comme son nom l'indique, les conteneurs doivent également avoir des rouleaux avant et des roues à l'arrière pour que le câble puisse les tirer sur le châssis. Les rails sur le châssis du camion et sous les conteneurs aident à aligner le chargement. La plupart des camions équipés de ce système ont deux rails séparés d'environ 35 pouces, tandis que les conteneurs ont deux rails séparés d'environ 36 pouces. La figure 3.4 représente un camion interne de type « *Roll-off* ».

Figure 3.4 Camion de levage de type « *Roll-off* »

Le CRPM désigne un ensemble composé d'un camion et d'une remorque dont le plancher est un convoyeur pleine largeur qui défile vers l'arrière de la remorque au déchargement. Le plancher mobile est actionné par des moteurs hydrauliques. La figure 3.5 présente un CRPM. Les dimensions de la boîte d'un CRPM, telles que présentées dans la figure 3.6, sont de 53'x8,5'x9,33', pour un volume total de 4203 pieds cubes, soit 4 EQV.

Figure 3.5 Camion avec une remorque à plancher mobile (CRPM)

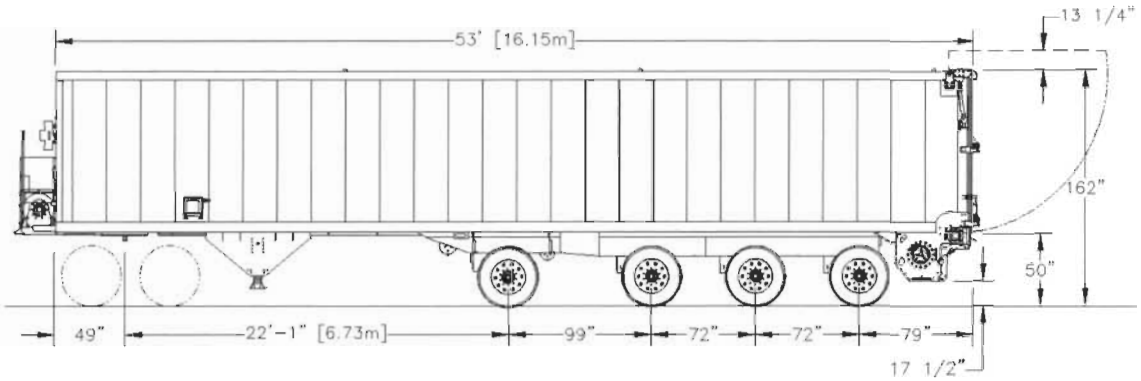


Figure 3.6 Dimensions de la boîte d'un CRPM

(https://www.temisko.com/produits/vrac/remorque-a-plancher-mobile/)

3.1.2.2 Système logistique alternatif proposé

Le système logistique alternatif proposé dans ce mémoire a recours à une flotte de camions munis d'un système de levage à crochet (*Hook-lift*) plutôt que des camions de type « *Roll-off* ». Le treuil à câble monté sur le camion est donc supprimé. Un gros crochet à commande hydraulique est positionné à l'avant du plateau du camion. Le conducteur relie

le crochet du camion à un crochet de réception sur le conteneur et le soulève sur le camion. Les conteneurs compatibles ne nécessitent pas de roulettes avant car le système de levage à crochet les hisse directement sur la plate-forme du camion au lieu de les rouler dessus. Dans le système logistique proposé, les camions internes assurent le transport des conteneurs entre les sites de clients et les sites de l'entreprise. De plus, dans le système logistique proposé, ce type de camion est aussi utilisé pour assurer le transport des conteneurs entre la zone d'échange de l'usine de tri et de traitement et au dépôt de l'usine de tri et de traitement. Ils sont alors appelés « les camions de service » afin de les distinguer des camions internes. La figure 3.7 représente la procédure de chargement/déchargement d'un conteneur par un camion de type « *Hook-lift* », alors que la figure 3.8 représente un camion de type « *Hook-lift* ».

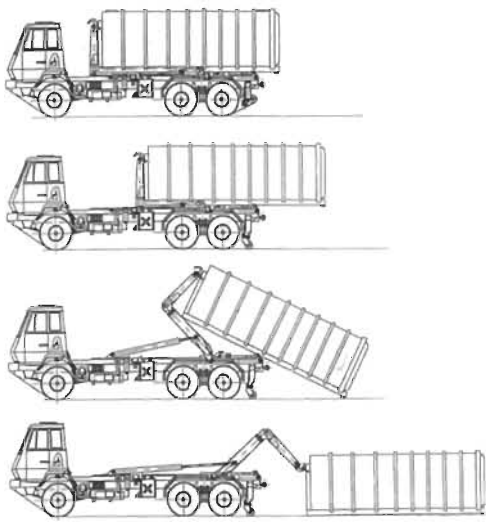


Figure 3.7 Procédure de chargement/déchargement d'un conteneur par un camion de type « *Hook-lift* »

(https://fr.made-in-china.com/co_cn-truck/product_16-18m3-Hydraulic-Lifter-Container-Hook-lift-Garbage-Truck_ruushisrg.html)

Figure 3.8 Camion de type « *Hook-lift* »

(https://www.hydreco.com/markets/hooklift-trucks)

Selon le chef de répartiteurs, le type « *Roll-off* » est le plus courant des deux types, de sorte qu'un plus grand nombre de conducteurs et de techniciens sont susceptibles de les connaître. De plus, les propriétaires peuvent probablement s'attendre à un plus grand choix s'ils souhaitent acheter un camion « *Roll-off* » d'occasion. Par contre, la cueillette et le positionnement d'un conteneur par le type « *Hook-lift* » sont plus rapides, car les conducteurs n'ont pas besoin de débarquer du camion afin de manutentionner le câble et opérer le treuil via les commandes situées du côté du camion. Des gains d'efficiences sont donc escomptés. Par exemple, dans le transport de biomasse forestière, le coût de l'application du système de camionnage « *Roll-off* » est de 16,71 USD/tonne selon Han et al. (2010), alors qu'il est 10,46 USD/tonne en se servant de système « *Hook-lift* » selon Harril et Han (2010).

Comme alternative au CRPM, il est possible de convertir un camion interne de type « *Hook-lift* » pour lui permettre de transporter deux ou trois conteneurs à la fois avec la méthode de levage à crochet. Il s'agit alors d'un CTR de levage à crochet tirant une remorque qui contient un ou deux autres conteneurs. La figure 3.9 représente une remorque de type « *Hook-lift*» dont la capacité est un conteneur, alors que la figure 3.10 représente un CTR dont la capacité est de trois conteneurs.

Figure 3.9 Remorque de type « Hook-lift » d'un conteneur

(https://www.agriexpo.online/prod/krampe-fahrzeugbau-landtechnik-und-metallbau-gmbh/product-169517-6133.html)

Figure 3.10 Camion train routier de type « Hook-lift » avec une remorque et trois conteneurs (https://www.facebook.com/MultiRecyclage)

Quant aux équipements de manutention présents aux centres de transbordement, une chargeuse et une pelle mécanique sont utilisé. Pour l'usine de tri et de traitement, ce sont plutôt deux chargeuses qui font les opérations de manutention. La figure 3.11 montre ces équipements à un centre de transbordement.

Figure 3.11 Équipements de manutention à un site de l'entreprise

3.1.3 Séquence des processus et flux de matières

3.1.3.1 Système logistique actuel

L'approche logistique utilisée actuellement par l'entreprise partenaire repose sur une conteneurisation partielle pour le transport des matières résiduelles entre les sites des clients et l'usine de tri et de traitement. Plus précisément, lorsqu'un conteneur est plein chez un client, un camion interne assure la livraison d'un nouveau conteneur vide chez le client et assure le transport du conteneur plein au centre de transbordement ou à l'usine de tri et de traitement. À cet endroit, après avoir passé la file d'attente de l'entrée et la balance, les camions internes et externes déchargent au sol leurs conteneurs pleins. Les équipements de manutention font alors les opérations de manutention pour déplacer les matières dans des emplacements dédiés à un entreposage temporaire. Après avoir passé la file d'attente à la sortie et la balance de sortie, les camions internes repartent avec un conteneur vide vers le site du prochain client. Aux centres de transbordement, les matières accumulés sont chargées par une pelle mécanique dans un camion avec remorque à plancher mobile afin d'être acheminées du centre de transbordement à l'usine de tri et de traitement.

Durant la journée, il se crée régulièrement des files d'attente de plusieurs camions internes et externes en attente d'être déchargés de leurs matières ou des CRPM en attente d'être chargés, lorsque le taux d'arrivée des camions surpasse la capacité de la zone de transbordement. Un constat similaire est observé à l'usine de tri et de traitement qui doit

également assurer le déchargement des camions internes desservant les clients dans sa périphérie. À l'usine de tri et de traitement, les camions externes et les CRPM déchargent leurs matières de la même manière. La figure 3.12 présente les flux de véhicules dans l'approche logistique actuelle.

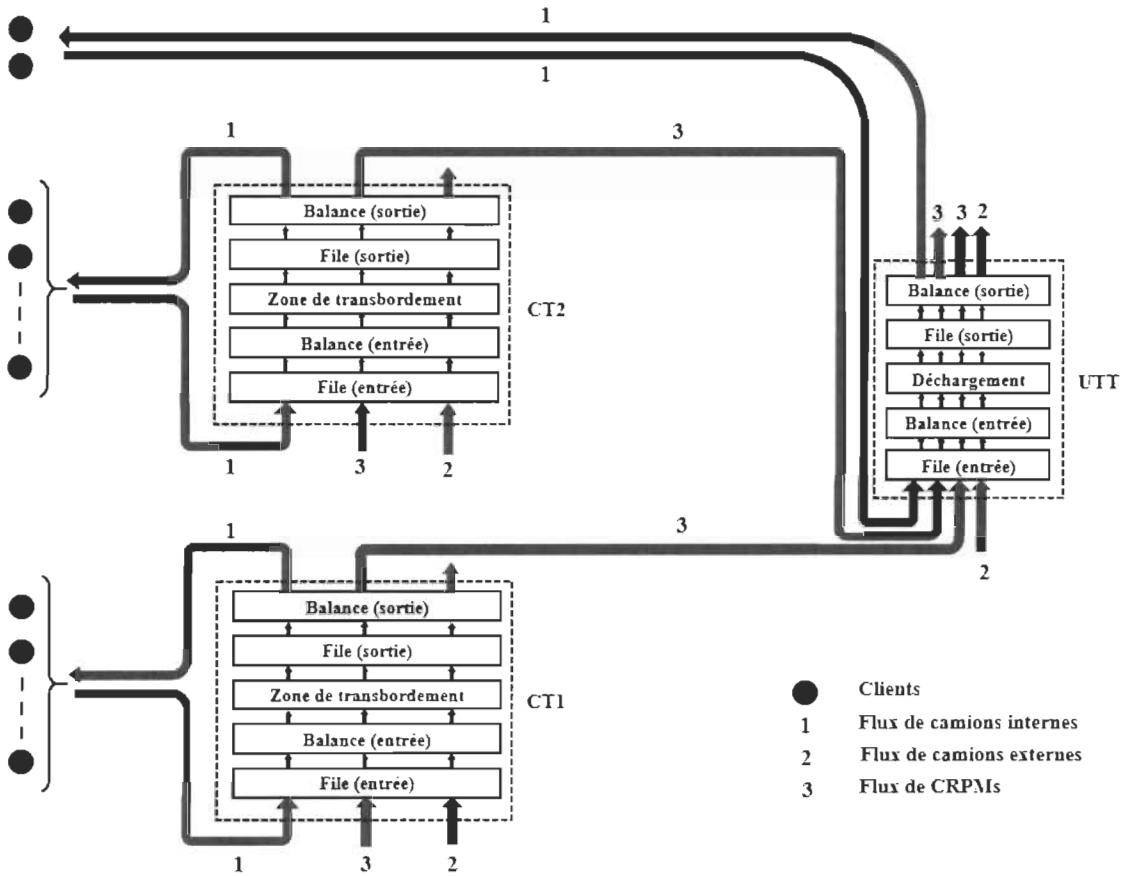


Figure 3.12 Flux de véhicules dans l'approche actuelle

En recevant les appels des clients pendant la journée, l'entreprise élabore pour la journée suivante une liste quotidienne de tâches de transport à réaliser avec une flotte de camions internes, selon l'ordre des appels reçus. Une tâche de transport consiste en un numéro de tâche, le site d'origine du client à desservir et le type de tâche. Toutes les tâches sont divisées en trois types. La tâche de type 1 (la livraison) est une tâche par laquelle le camion se dirige vers le site du client en transportant un conteneur vide et, après avoir déposé le conteneur vide, il va vers le site de l'entreprise le plus proche sans conteneur pour réaliser

sa prochaine tâche. Ce type de tâche survient majoritairement lorsqu'un client passe une commande pour la première fois et qu'il n'existe aucun conteneur sur le site. La tâche de type 2 (l'échange) est une tâche par laquelle un camion se dirige vers le site du client en portant un conteneur vide et, après avoir déposé le conteneur vide, récupère un conteneur plein, puis revient vers le site de l'entreprise le plus proche. La majorité des tâches sont de ce type pour récupérer un conteneur plein qui se trouve chez le client et l'échanger contre un conteneur vide. La tâche de type 3 (la cueillette) est une tâche par laquelle le camion se dirige vers le site du client sans conteneur. Au site, après avoir chargé un conteneur plein, il revient vers le site de l'entreprise le plus proche. Ce type de tâche survient lorsqu'un client n'a plus besoin de conteneur.

À chacun des centres de transbordement, les camions internes et externes déchargent les matières de leurs conteneurs et les CRPM sont chargés par une pelle mécanique. Lorsqu'un camion interne arrive à un des centres de transbordement et après avoir attendu dans la file d'attente s'il y a lieu, il est pesé par la balance à l'entrée du site et dirigé vers l'espace de déchargement. Le processus est le même pour les camions externes. Par contre, après avoir été pesés, les CRPM sont dirigés vers l'espace de chargement. Les matières déchargées au sol par les camions internes et externes sont transférées par une chargeuse vers les dépôts. La capacité de l'espace de déchargement est d'un camion à la fois et lors de l'opération de déchargement, la chargeuse ne peut pas ramasser les matières déchargées. Autrement dit, les opérations de déchargement par camion et ramassage par la chargeuse ne peuvent pas être faites en même temps. Il faut que la chargeuse attende que le camion termine son déchargement et quitte cet espace, puis la chargeuse va ramasser les matières déchargées. De la même manière, pendant l'opération de ramassage par la chargeuse, le camion suivant ne peut pas entrer dans l'espace de déchargement. À l'espace de chargement positionné plus bas, le CRPM est chargé par la pelle mécanique. L'ensemble des camions, après avoir terminé leurs opérations, se dirigent vers la balance à la sortie. En raison de la limitation de la capacité des équipements de manutention et de l'espace, il existe un nombre maximal de camions internes et externes (type « *Roll-off* » et CRPM) pouvant être admis simultanément dans la zone de transbordement selon une

notion qui s'appelle la capacité équivalente. Elle sera considérée de 5 unités dans le cadre de ce mémoire. Une unité sera déduite de cette capacité par l'entrée d'un camion interne ou externe et deux unités seront déduites par l'entrée d'un CRPM. De même manière, une ou deux unités seront ajoutées à cette capacité lors de la sortie d'un camion interne ou externe et d'un CRPM. D'ailleurs, en raison de la capacité limitée de la zone de transbordement, au plus un CRPM sera autorisé à entrer en même temps à cette zone. La figure 3.13 présente la séquence des opérations aux centres de transbordement.

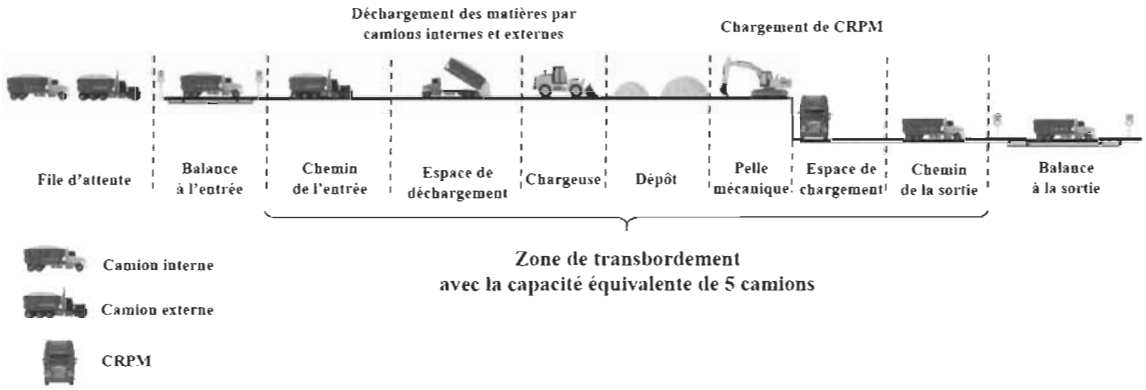


Figure 3.13 Séquences des opérations aux centres de transbordement

Dans la chaîne logistique de l'entreprise de recyclage partenaire, les centres de transbordement ont pour but de diminuer la distance parcourue par les camions internes. Malgré leur existence, il s'avère que les opérations à ces centres représentent des goulots pour le flux de matières en raison de la capacité d'accueil limitée. Les files d'attente à l'entrée de ces sites entraînent des coûts.

Le système de déchargement des matières à l'usine de tri et de traitement est le même que celui aux centres de transbordement. Après une probable file d'attente, les camions sont pesés à la balance à l'entrée du site et tous les camions sont dirigés vers l'espace de déchargement pour faire l'opération du déchargement. La seule différence est qu'à l'usine de tri et de traitement, les CRPM font également les opérations de déchargement et le dépôt de l'usine de tri et de traitement représente la fin du processus. La séquence des opérations à l'usine de tri et de traitement est présentée à la figure 3.14.

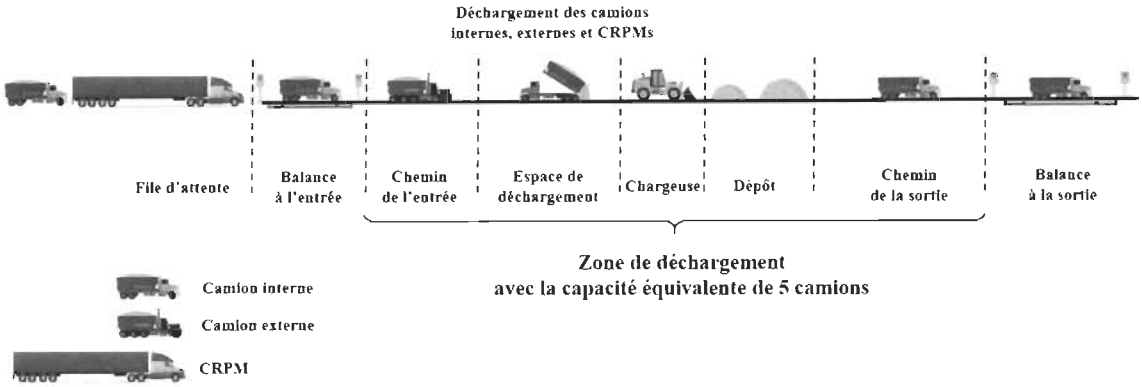


Figure 3.14 Séquences des opérations à l'usine de tri et de traitement

3.1.3.2 Système logistique alternatif proposé

Tel que discuté avec les responsables de l'entreprise au cours des entrevues réalisées, selon l'approche logistique alternative proposée, les camions internes, qui sont alors tous de type « *Hook-lift* », entrent dans les centres de transbordement sans avoir besoin de passer à la balance et faire l'opération de pesage. Le camion de type « *Hook-lift* » livre son conteneur plein à la zone d'échange et ramasse un nouveau conteneur vide qu'un CTR a déjà positionné dans cette zone. De cette façon, les matières résiduelles sont transportées depuis les sites de clients jusqu'à l'usine de tri et de traitement dans les mêmes conteneurs, sans que le contenu soit déchargé au sol. C'est donc une approche deconteneurisation intégrale plutôt que partielle du transport. À l'usine de tri et de traitement, on utilise également une zone d'échange où les camions internes et les trains routiers livrent leur conteneur plein et ramassent le (les) conteneur(s) vide(s). Par la suite, ce sont les camions de type « *Hook-lift* » appelés les camions de service qui assurent le transport de conteneurs pleins depuis la zone d'échange jusqu'au dépôt de l'usine de tri et de traitement. En ce qui concerne les camions externes, ils parcourent le même trajet qu'ils font dans l'approche actuelle. La figure 3.15 représente les flux de véhicules dans l'approche logistique alternative proposée.

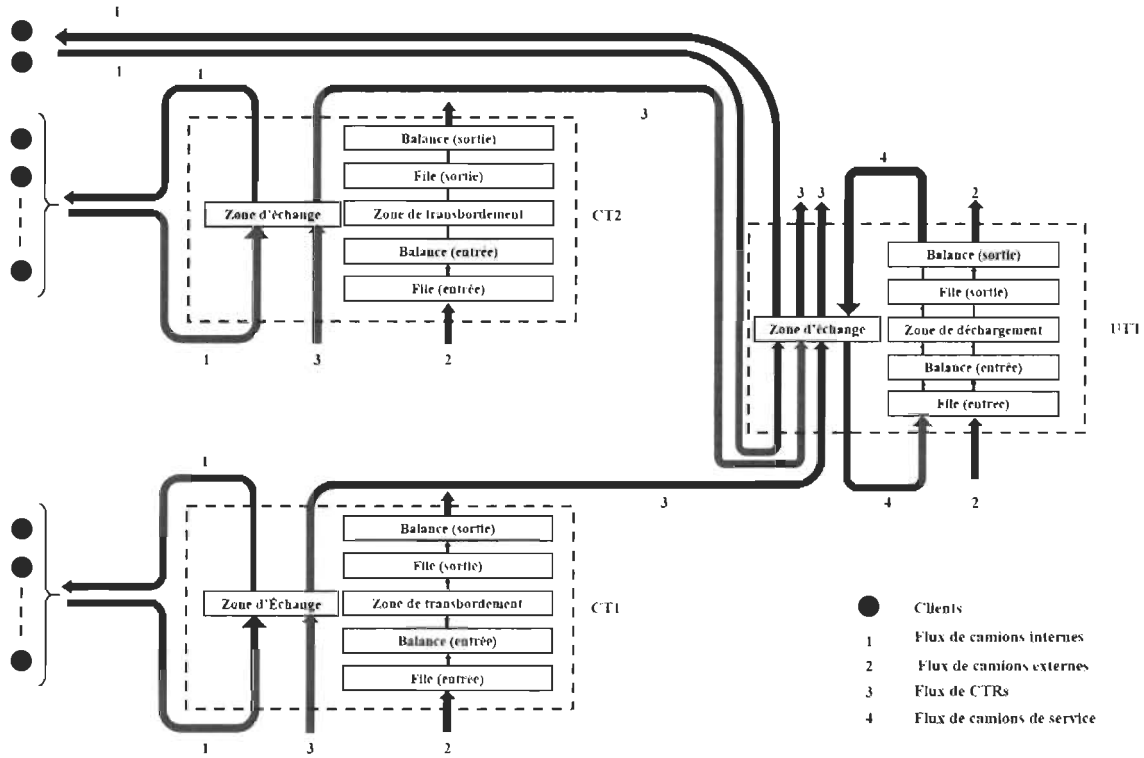


Figure 3.15 Flux de véhicules dans l'approche logistique alternative proposée

L'idée principale derrière l'approche alternative proposée est de réduire les opérations de manutention au niveau du déchargement des conteneurs de camions internes en misant sur l'utilisation des CTR équipés de système « *Hook-lift* » pouvant transporter deux conteneurs à la fois, en remplacement des CRPM. En éliminant le recours aux équipements de manutention pour les camions internes et en dirigeant toute la capacité des équipements de manutention vers les camions externes, des files d'attente réduites sont escomptées aux centres de transbordement et l'usine de tri et de traitement. La figure 3.16 présente les flux des matières et véhicules aux centres de transbordement pour l'approche logistique alternative proposée.

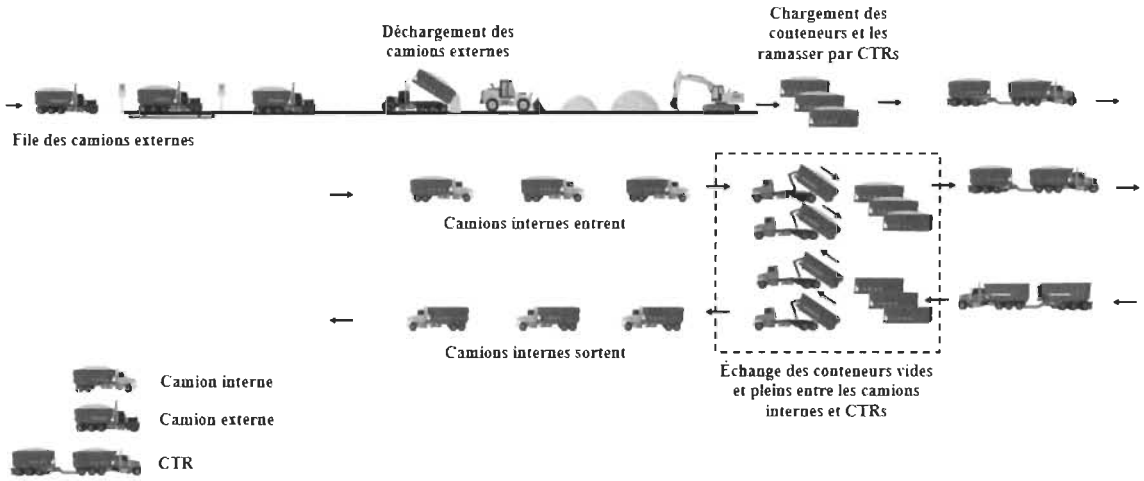


Figure 3.16 Flux des opérations aux centres de transbordement selon l'approche logistique alternative proposée

Quant aux opérations à l'usine de tri et de traitement, les camions de service récupèrent les conteneurs pleins de la zone d'échange et se dirigent vers la zone de déchargement, qui se situe à environ un kilomètre de la zone de d'échange. Ils déchargent les matières des conteneurs et ils retournent les conteurs vides à la zone d'échange. De cette façon, l'utilisation des camions de service permet d'atténuer le goulot créé par les équipements de manutention pour les opérations de déchargement.

L'utilisation des camions de service dans le but d'effectuer les opérations de déchargement plutôt que de recourir aux camions internes et CTR a plusieurs bénéfices. Premièrement, elle empêche de retenir la capacité des camions internes et CTR dans une file d'attente qui mène à une croissance au niveau de l'efficacité de ces derniers. Deuxièmement, la mise en place des camions de service permet de rendre plus uniforme le taux d'arrivée des matières à l'usine de tri et de traitement. La zone d'échange est alors utilisée comme une zone tampon (*buffer*) dans la chaîne logistique, permettant d'accumuler des conteneurs en période de pointe sans pourtant nuire aux opérations de transport des conteneurs à partir et vers les sites des clients. Troisièmement, il est possible de définir un quart de soir pour les camions de service et ainsi décaler leurs opérations en dehors des heures de pointe afin de réduire la circulation dans la zone d'échange. De plus, puisque les camions internes, les CTR et les camions de services sont du même type, il est

possible de changer le rôle des camions aux divers moments de la journée selon les besoins. La figure 3.17 représente les flux des matières et véhicules de l'approche logistique proposée pour l'usine de tri et de traitement.

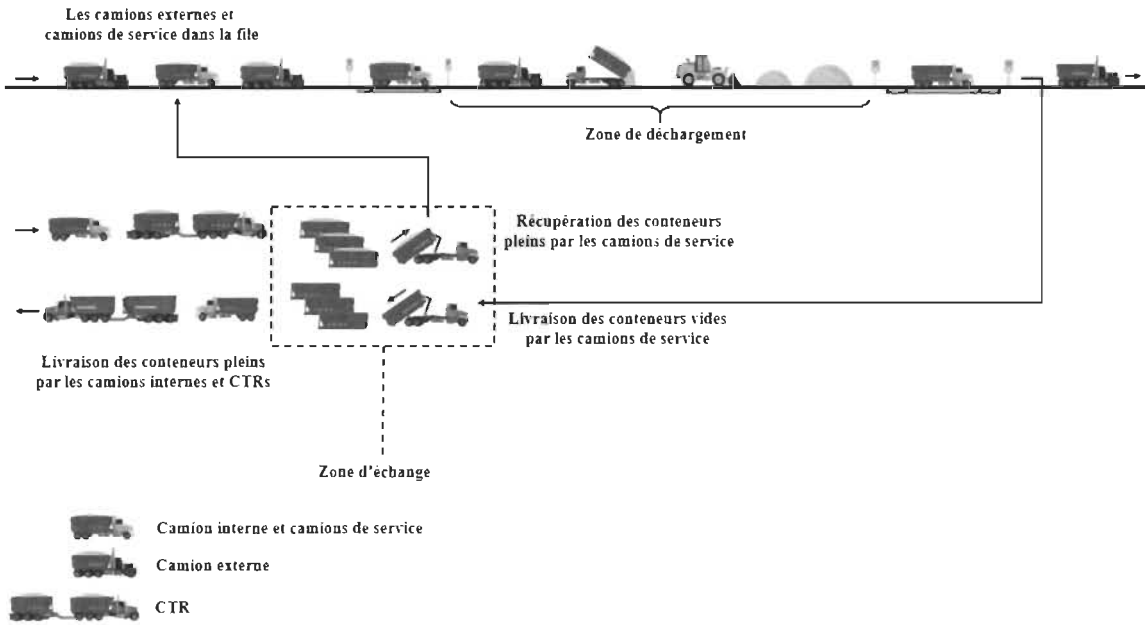


Figure 3.17 Flux des matières et véhicules à l'usine de tri et de traitement de l'approche logistique proposée

3.1.4 Chronométrage des opérations

Afin de mesurer la durée de diverses opérations, des chronométrages ont été réalisés sur le terrain. À cette fin, pendant une journée de collecte d'information, un échantillonnage du temps des opérations a été fait. Les opérations pour lesquelles le chronométrage a été fait sont les suivantes :

1- Opération de la cueillette d'un conteneur par camions de type « *Roll-off* » ;

2- Opération du positionnement d'un conteneur par camion « *Roll-off* » ;

3- Opération du pesage aux balances ;

4- Opération du déchargement des matériaux d'un conteneur par un camion interne et externe ;

5- Opération du ramassage des matériaux de l'espace de déchargement par la chargeuse et transport vers le dépôt ;

6- Opération du chargement d'un CRPM par la pelle mécanique ;

7- Opération du déchargement des matériaux par un CRPM.

Dans le cas des opérations de l'approche logistique alternative proposée, puisque de telles opérations ne sont pas réalisées en ce moment, les durées d'opérations de chargement/déchargement des conteneurs par camions de type « *Hook-lift* » ont été estimées par un fournisseur d'équipement de levage de type « *Hook-lift* » et corroboré par les dirigeants de l'entreprise partenaire.

3.1.5 Taux d'arrivée des camions

Généralement, les camions internes débutent leur journée de travail à 5h30. Ils quittent alors le centre de répartition et se dirigent vers les sites de clients selon le plan des tâches à réaliser établi la veille. Selon la distance à parcourir pour réaliser les tâches à faire, le nombre de clients desservis par chaque camion interne diffère. Afin d'éviter la congestion routière dans l'après-midi, ils retournent au centre de répartition avant 16h00.

Les employés des centres de transbordement débutent leurs opérations à 5h30 par une réception des premiers CRPM et leurs quarts de travail se terminent à 16h00. De son côté, le quart de travail de l'usine de tri et de traitement commence à 5h30 et termine à 19h00, car l'arrivage de CRPM peut continuer jusqu'à 18h00. Par conséquent, dans la journée étudiée, les données ont été collectées à partir de 5h30 jusqu'à 19h00. Le tableau 3.1 présente le nombre de camions aux entrées des différents sites, pendant la journée d'observation, alors que les tableaux 3.2, 3.3 et 3.4 présentent la répartition des taux d'arrivée de divers types de camions aux CT1, CT2 et l'UTT.

Tableau 3.1 Nombre de camions observés aux entrées

Sites	**Type de camions**	**Nombre total de camions observés dans la journée aux entrées**	**Répartition selon le type de camion**
CT1	Camions internes	24	31,58%
	Camions externes	42	55,26%
	CRPM	10	13,16%
CT2	Camions internes	18	32,73%
	Camions externes	27	49,09%
	CRPM	10	18,18%
UTT	Camions internes	21	24,14%
	Camions externes	46	52,87%
	CRPM	20	22,99%

Tableau 3.2 Taux d'arrivée des camions par heure au CT1

	Avant 6h	6h-7h	7h-8h	8h-9h	9h-10h	10h-11h	11h-12h	12h-13h	13h-14h	14h-15h	15h-16h
Camions internes	0	3	4	2	3	4	3	1	1	2	1
Camions externes	0	1	4	5	2	2	1	2	1	0	0
CRPM	1	1	1	1	0	1	1	1	1	2	0
Total	1	5	9	8	5	7	5	4	3	4	1

Tableau 3.3 Taux d'arrivée des camions par heure au CT2

	Avant 6h	6h-7h	7h-8h	8h-9h	9h-10h	10h-11h	11h-12h	12h-13h	13h-14h	14h-15h	15h-16h
Camions internes	0	1	4	5	2	2	1	2	1	0	0
Camions externes	1	1	2	6	5	3	4	1	2	0	0
CRPM	0	2	1	1	0	1	1	1	1	2	0
Total	1	4	7	12	7	6	6	4	4	2	0

Tableau 3.4 Taux d'arrivée des camions par heure à l'usine de tri et de traitement

	Avant 6h	6h-7h	7h-8h	8h-9h	9h-10h	10h - 11h	11h - 12h	12h - 13h	13h - 14h	14h - 15h	15h - 16h	16h - 17h	17h - 18h	18h - 19h
Camions internes	0	3	2	2	5	4	1	1	2	1	0	0	0	0
Camions externes	2	5	4	4	3	2	1	2	3	3	2	0	0	0
CRPM	0	0	1	2	2	2	1	3	2	1	1	3	1	1
Total	2	8	7	8	10	8	3	6	7	5	3	3	1	1

Le temps moyen d'attente aux files de CT1, CT2 et l'UTT ainsi que le temps moyen de passage pour les camions internes, externes et CRPM sont présentés dans les tableaux 3.5 et 3.6.

Tableau 3.5 Temps moyen d'attente selon les données collectées

	CT1	CT2	UTT
Temps moyen d'attente dans la file (h)	0,81	0,96	1,19

Tableau 3.6 Temps moyen de passage selon les données collectées

	Camions internes	Camions externes	CRPM
Temps moyen de passage (h)	1,79	1,01	0,72

Les arrivées des CRPM qui correspondent aux données observées au tableau 3.1, suivent un horaire fixe dans le cadre d'un système de rendez-vous (RDV). Le tableau 3.10 représente les heures d'arrivée des CRPM à chacun des centres de transbordement. Dans la journée étudiée, tous les CRPM étaient à l'heure aux sites attribués. De la même manière, dans le système logistique proposée, les CTR commencent leur journée à 5h35,

pour transporter le même volume des matières résiduelles depuis les centres de transbordement jusqu'à l'usine de tri et de traitement.

Tableau 3.7 Temps d'arrivée de CRPM aux centres de transbordements

	CT1	CT2
1	05:35:00	06:05:00
2	06:20:00	06:40:00
3	07:15:00	07:30:00
4	08:45:00	08:45:00
5	10:15:00	10:15:00
6	11:10:00	11:10:00
7	12:10:00	12:10:00
8	13:10:00	13:10:00
9	14:15:00	14:15:00
10	14:45:00	14:45:00

3.1.6 Ajustement des distributions aux données collectées

Afin de déterminer le temps des opérations dans le modèle de simulation, l'ajustement des distributions associées aux opérations est fait en recourant au logiciel Easyfit. Le tableau 3.8 présente les distributions statistiques associées au temps de diverses opérations. Dans ce tableau, le « n » indique le nombre d'observations réelles et la distribution liée à la durée du levage ou positionnement d'un conteneur par les camions « Hook-lift » est obtenue selon l'avis des experts.

Tableau 3.8 Distributions statistiques associées au temps des opérations

	Étapes	**n**	**Min**	**Max**	**Moyenne**	**Écart-type**	**Distribution**
1	Levage ou positionnement d'un conteneur par les camions « *Roll-off* » (h)	23	0,079	0,243	0,132	0,037	Beta $\alpha 1 = 29,243$ $\alpha 2 = 170,04$
2	Levage ou positionnement d'un conteneur par les camions « *Hook-lift* » (h)	-	0,05	0,083	0,067	0,019	Triangulaire
3	Pesage sur la balance (h)	71	0,041	0,075	0,059	0,008	Weibull $\alpha = 7,6239$ $\beta = 0,06142$
4	Déchargement (camions internes et externes) (h)	36	0,044	0,081	0,063	0,009	Lognormal $M = -2,3107$ $Sd = 0,50599$
5	Ramassage des matériaux (chargeur) (h)	36	0,017	0,051	0,033	0,061	Triangulaire
6	Chargement des matériaux (pelle mécanique) (h)	7	0,519	1,049	0,761	0,129	Gamma $\alpha = 29,514$ $\beta = 0,02973$
7	Déchargement des matériaux (CRPM) (h)	5	0,039	0,073	0,347	0,009	Gamma $\alpha = 14,312$ $\beta = 0,0249$

Tableau 3.8 Distributions statistiques associées au temps des opérations (suite)

8	Taux d'arrivée des camions externes (camion/h)	84	0	6	2,67	1,5	Exponentielle M= 2,67
9	Temps de remplissage d'un conteneur par une chargeuse (h)	8	0,03	0,07	0,05	0,017	Triangulaire

3.2 Conception du modèle de simulation

Dans cette section, le modèle destiné à la simulation, les entités et les organigrammes du modèle de simulation sont présentés. Pour ce modèle de simulation, les opérations de transport et de manutention du système logistique actuel ainsi que celles du système logistique alternatif proposé sont modélisées. Le modèle de simulation a été développé à l'aide des organigrammes et implanté en recourant au logiciel de simulation Simio. Pour générer une représentation visuelle du déplacement des camions, l'outil de cartographie du logiciel a été utilisé. De plus, au niveau des paramètres sur le taux d'arrivée, le temps de traitement et les temps de chargement/déchargement, les distributions les plus pertinentes sont ajustées en fonction des données collectées et présentées au tableau 3.5. Dans le modèle de simulation développé, la liste des tâches par journée est obtenue à partir de l'analyse d'un échantillon des données historiques. Le modèle de simulation doit respecter l'ordre des tâches de la liste lors de l'allocation du prochain camion libre. La simulation débute par l'allocation du premier camion de la flotte de camions internes à la première tâche de la liste, puis le deuxième camion à la seconde tâche de la liste et ainsi de suite, jusqu'à ce que toutes les tâches de la liste de tâches soient attribuées. Le périmètre de la simulation est dès le départ des camions internes depuis le CR jusqu'au déchargement des matières résiduelles à l'usine de tri et de traitement.

3.2.1 Entités du modèle

Les entités qui circulent dans le modèle de simulation sont le flux des matières CRD en pied cube. Notons que majoritairement, elles sont transportées en conteneur (container entity). Quant aux divers types de camions, l'objet de véhicule est utilisé.

3.2.2 Déplacement et trajectoires

Sachant que la simulation de ce mémoire est à événement discret, la séquence des événements de simulation ainsi que la trajectoire des entités sont précisées dans cette section sur la base des organigrammes qui ont été conçus pour le système logistique actuel et alternatif.

En plus des déplacements des camions entre les centres de transbordement et l'usine de tri et de traitement, les déplacements des camions entre les clients et sites de l'entreprise sont modélisés. La raison principale est le fait que la réduction du temps des opérations des camions « Hook-lift » aux sites de clients par rapport à ceux des camions « Roll-off » change le taux d'arrivée des camions aux sites de l'entreprise. Autrement dit, le taux d'arrivée des camions internes aux sites de l'entreprise est une variable dépendante des opérations aux sites de clients et le taux d'arrivée des camions dans les deux systèmes logistiques n'est pas le même.

Un des défis de ce projet est d'avoir deux systèmes logistiques différents dans un seul modèle de simulation de sorte qu'en changeant la valeur d'un paramètre intrant, le type de système logistique change. C'est parce que nous avons l'intention de comparer les différents scénarios de ces deux systèmes logistiques dans le cadre des scénarios de transition en même temps. Pour ce faire, nous avons défini un paramètre intrant appelé « Type de système » qui prend la valeur 1 pour le système logistique actuel et prend la valeur 2 pour le système logistique proposé. De plus, dans la simulation des scénarios de système logistique actuel, le nombre de camions Hook-lift et trains routiers est zéro, tandis que

dans la simulation des scénarios de système logistique alternatif, le nombre de camions Roll-off et CRPM est zéro.

En ce qui concerne les camions internes, soit de type Roll-off ou Hook-lift, s'il n'y a pas de tâche à faire, ils stationnent au CR. Au contraire, en présence d'une tâche à faire, on doit vérifier d'abord s'il y a ou pas un conteneur vide sur le camion. Au cas où la tâche à faire est de type 1 (livraison) ou de type 2 (échange) et qu'il existe un conteneur vide sur le camion, le camion se dirige vers le site de client correspondant à cette tâche. Au contraire, s'il n'existe pas un conteneur vide sur le camion, le camion prend un conteneur vide avant d'aller vers le client. Pour la tâche de type 3 (cueillette), c'est la situation opposée. S'il n'existe pas un conteneur vide sur le camion, le camion se dirige directement vers le site d'un client et au cas où il existe un conteneur vide sur le camion, il va déposer son conteneur au dépôt des conteneurs vides avant d'aller vers le site du client.

Au site d'un client, pour les tâches de type 1, le camion positionne seulement son conteneur vide sur sol; pour les tâches de types 2, il positionne son conteneur vide et cueille le conteneur plein du client; pour les tâches de type 3, il cueille seulement le conteneur plein du client. Ensuite, il se dirige vers un centre de transbordement ou l'usine de tri et de traitement. Si le site du client est localisé au territoire 1, le camion se dirige vers le centre de transbordement 1; pour les clients du territoire 2, le camion va vers l'usine de tri et traitement et pour les clients du territoire 3, il se dirige vers le centre de transbordement 2.

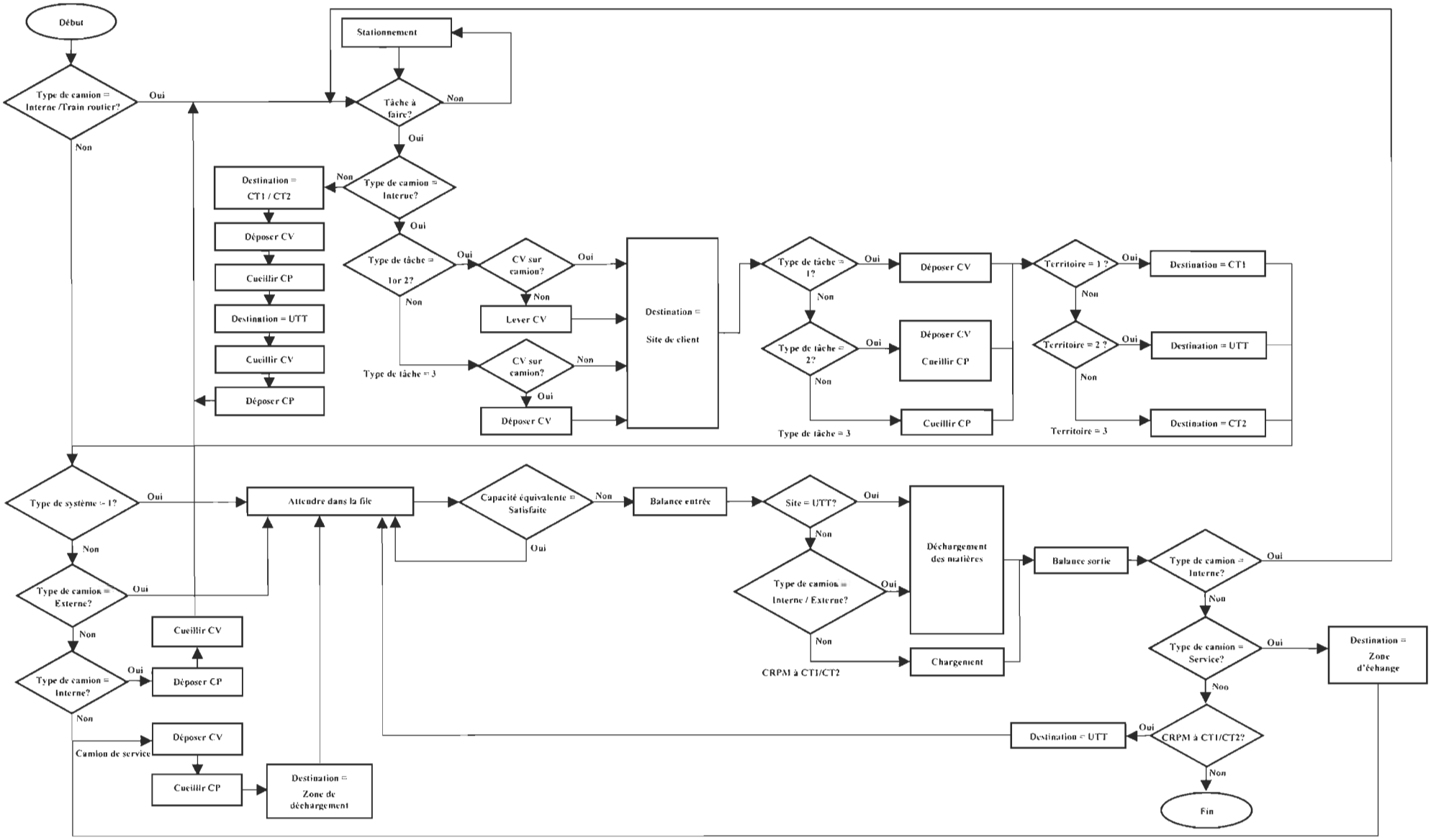
Comme mentionné précédemment, la trajectoire de flux des camions aux sites de l'entreprise est définie en fonction de la valeur du paramètre « Type de système ». Ainsi, pour la valeur 1 les camions internes, externes et CRPM se dirigent vers la file d'attente et si le nombre de camions dans la zone de transbordement aux centres de transbordement ou à la zone de déchargement à l'usine de tri et de traitement est inférieur à la capacité équivalente, ils se dirigent vers la balance d'entrée (ou balance 1). Sinon, ils attendent. À l'usine de tri et traitement, tous les types de camions déchargent les matières de leurs conteneurs, tandis qu'aux centres de transbordement, les camions internes et externes

déchargent les matières de leurs conteneurs et les CRPM sont chargés des matières résiduelles. Ensuite, après avoir passé la balance de sortie (ou balance2) à l'usine de tri et traitement, les CRPMs et camions externes sortent du site et les camions internes vérifient s'il y a une autre tâche à faire ou non, alors qu'aux centres de transbordement, les CRPM se dirigent vers l'usine.

En ce qui concerne le système logistique alternatif proposé, la valeur du paramètre « Type de système » est 2. Donc, les camions internes qui viennent des sites de clients se dirigent vers la zone d'échange. Ils déposent leurs conteneurs pleins et cueillent un conteneur vide. S'il existe une autre tâche à faire, ils se dirigent vers le prochain client et sinon, ils stationnent au CT. Les trains routiers assurent le transport des conteneurs pleins de la zone d'échange des centres de transbordement à la zone d'échange de l'usine de tri et de traitement ainsi que le transport des conteneurs vides de la zone d'échange de l'usine à la zone d'échange des centres de transbordement. Les camions de service ramassent un conteneur plein dans la zone d'échange de l'usine et le transportent à travers une distance d'environ un kilomètre à la zone de déchargement de l'usine. Ils attendent dans la file d'attente et si le nombre de camions dans la zone de déchargement est inférieur à la capacité équivalente, ils passent sur la balance d'entrée, déchargent les matières de leurs conteneurs, passent sur la balance de sortie et se dirigent vers la zone d'échange de l'usine. À la zone d'échange, ils déposent leur conteneur vide et cueillent un autre conteneur plein. La figure 3.18 résume les processus de l'ensemble des camions dans les systèmes logistiques actuel et proposé.

Les trajectoires des camions aux centres de transbordement sont en fonction de leur type. Après avoir passé la file d'attente et la balance d'entrée, les camions externes et camions internes de type « Roll-off » se dirigent vers l'espace de déchargement et déchargent les matières de leurs conteneurs. Dans le système logistique actuel, les matières sont transférées par la chargeuse au dépôt et la pelle mécanique remplit les CRPM des matières de dépôt, alors que dans le système logistique proposé, la chargeuse remplit les conteneurs vides par les matières déchargées des camions « Roll-off ». Les trajectoires des camions

« Hook-lift » et trains routiers sont localisés avant de la file d'attente de sorte que les camions « Hook-lift » déposent d'abord leur conteneur plein et puis, ils vont cueillir un conteneur vide fourni par les trains routiers. Le fonctionnement des trains routiers est l'inverse. Ils déposent d'abord leurs conteneurs vides et puis ils ramassent les conteneurs pleins. À la fin, les camions internes de type « Roll-off », camions externes et CRPM passent sur la balance de sortie et quitte le centre de transbordement alors que les camions internes de type « Hook-lift » et les trains routiers sortent le centre de transbordement sans avoir besoin d'être pesés. La figure 3.19 représente la partie du modèle au niveau des centres de transbordement.



CR : Centre de Répartition

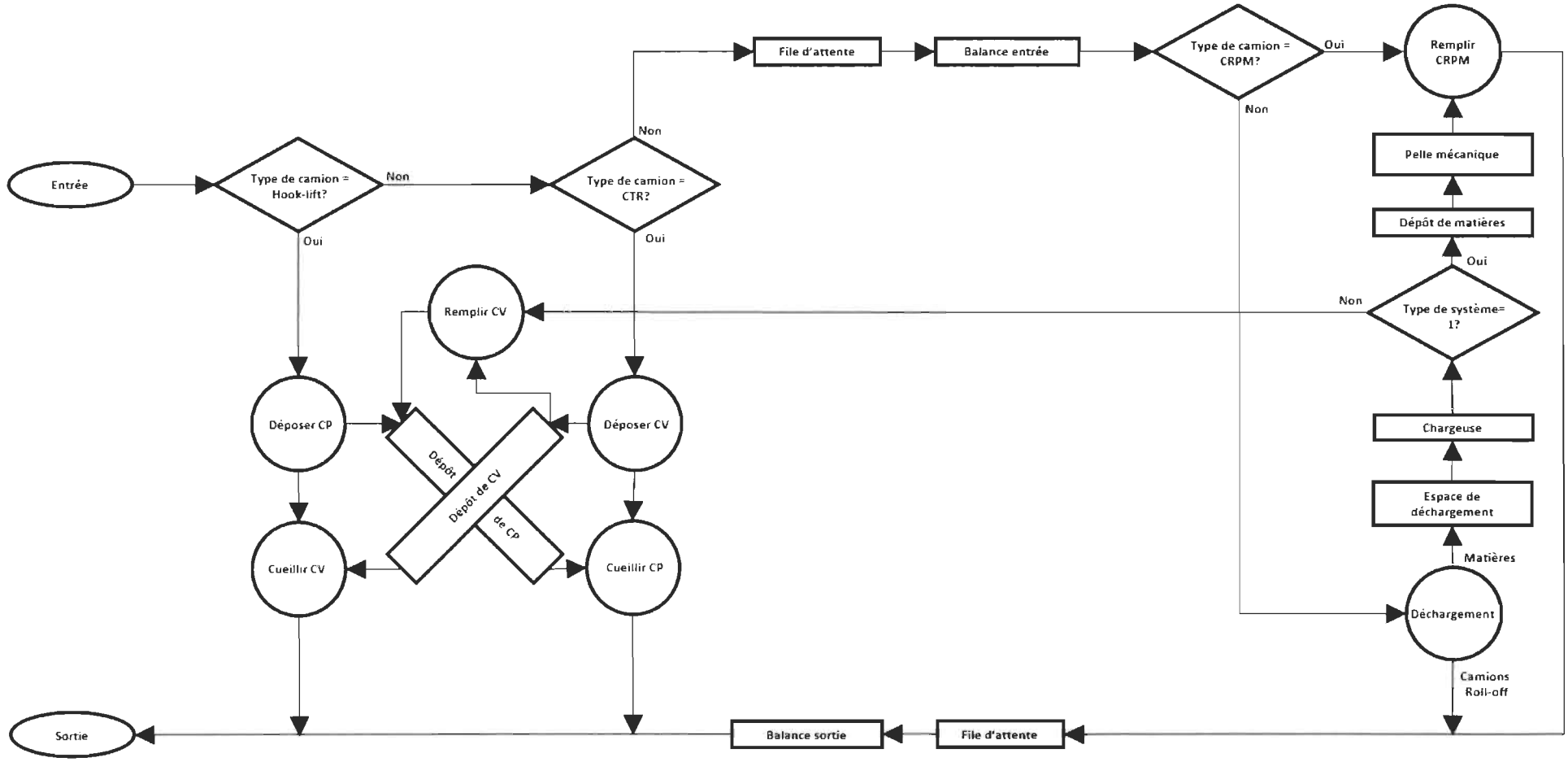
CT : Centre de transbordement

UTT : Usine de tri et de traitement

CV : Conteneur Vide

CP : Conteneur Plein

Figure 3.18 Organigramme du modèle de simulation



CV : Conteneur vide
CP : Conteneur plein

Figure 3.19 Organigramme du modèle de simulation au niveau des centres de transbordement

À l'usine de tri et traitement, les camions internes de type « Roll-off », les camions externes, les CRPM et les camions de service attendent dans la file, passe sur la balance d'entrée et puis déchargent leurs matières résiduelles dans l'espace de déchargement. Ensuite, la chargeuse transfère les matières déchargées au dépôt. Après avoir passé la balance de sortie, les camions de service se dirigent vers la zone d'échange alors que les autres quittent l'usine. À la zone d'échange, les camions de service déposent leurs conteneurs vides et cueillent un conteneur plein fourni par les camions internes de type « Hook-lift » ou les trains routiers. Ces derniers n'ont pas besoin d'être pesés et ils se dirigent seulement vers la zone d'échange afin de déposer leurs conteneurs pleins. La figure 3.20 représente l'organigramme de processus à l'usine de tri et de traitement.

3.3 Implantation du modèle dans le logiciel de simulation

Après avoir modélisé les opérations logistiques actuelles et alternatives en transport et manutention de l'entreprise, le modèle est implanté dans un logiciel de simulation. Pour générer une simulation proche de la réalité, un système d'information géographique (SIG) a été utilisé pour tracer les points de repère, la localisation des installations et obtenir des distances entre les sites.

Malgré que les matières CRD sont solides, puisqu'elles sont mesurées comme flux en unité de pied cube, dans la simulation elles sont considérées comme liquide. Pourtant, on n'a pas utilisé la source de flux « Flow source » pour générer les entités. Les entités sont générées par une source et puis elles sont passées par « ItemToFlowConverter » dont la valeur de la propriété « Flow Quantity per Item » est le volume de conteneur. La raison pour laquelle on utilise cette structure au lieu d'une source de flow est de bénéficier de l'option « Time Offset » de la source. Le flux de liquide d'une source de flux « FlowSource » est contrôlé par « Regulator » et le contrôler par les données d'un tableau apparaissait plus compliqué. Pour les conteneurs, l'objet « Container entity » est utilisé. Pour modéliser le site d'un client, un camion dépose son conteneur vide à l'entrée d'un « Filler » et cueille un conteneur plein qui a été déjà rempli par le client. La figure 3.21 représente le modèle utilisé au site d'un client dans la simulation.

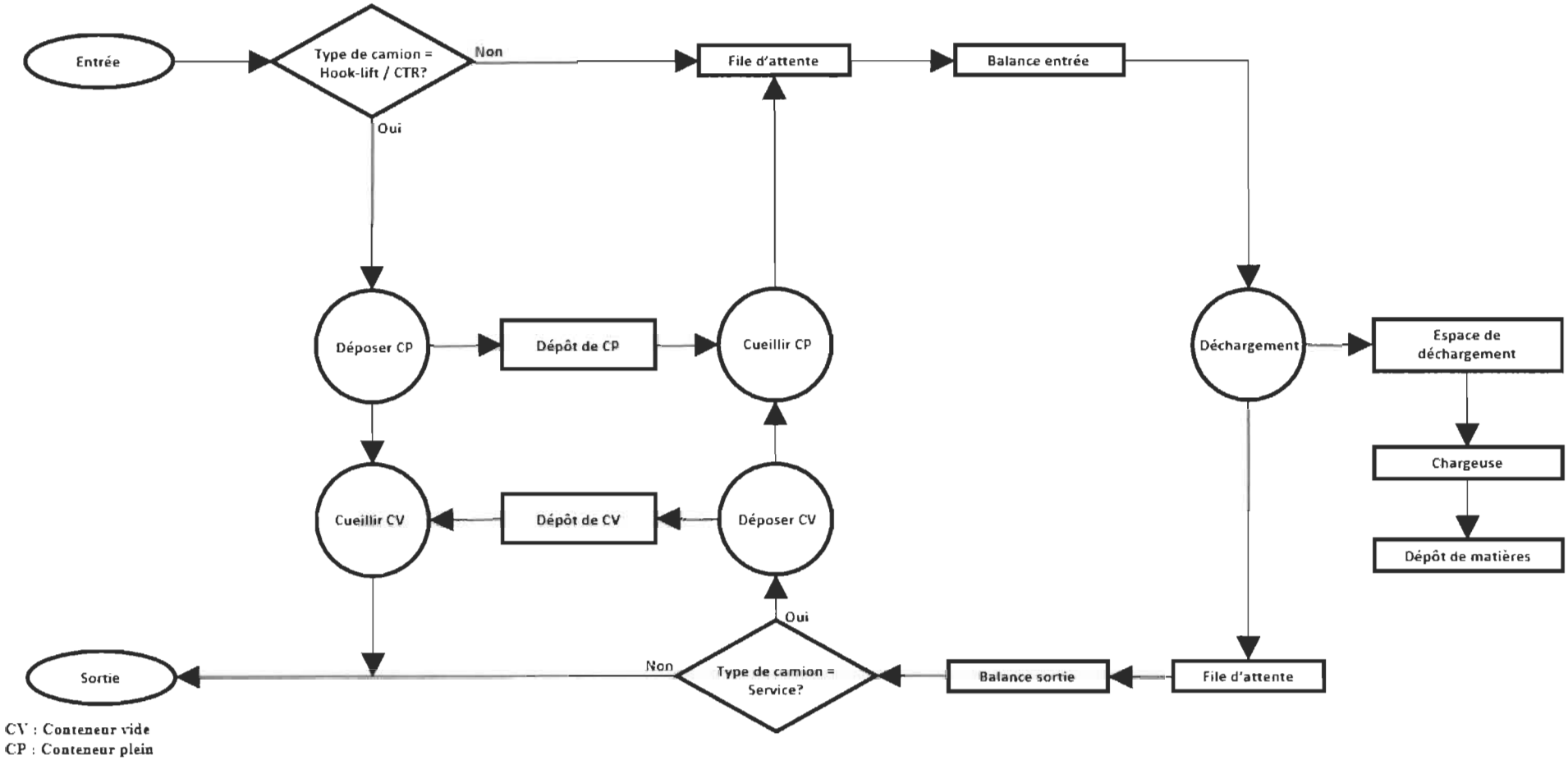


Figure 3.20 Organigramme du modèle de simulation au niveau de l'usine de tri et de traitement

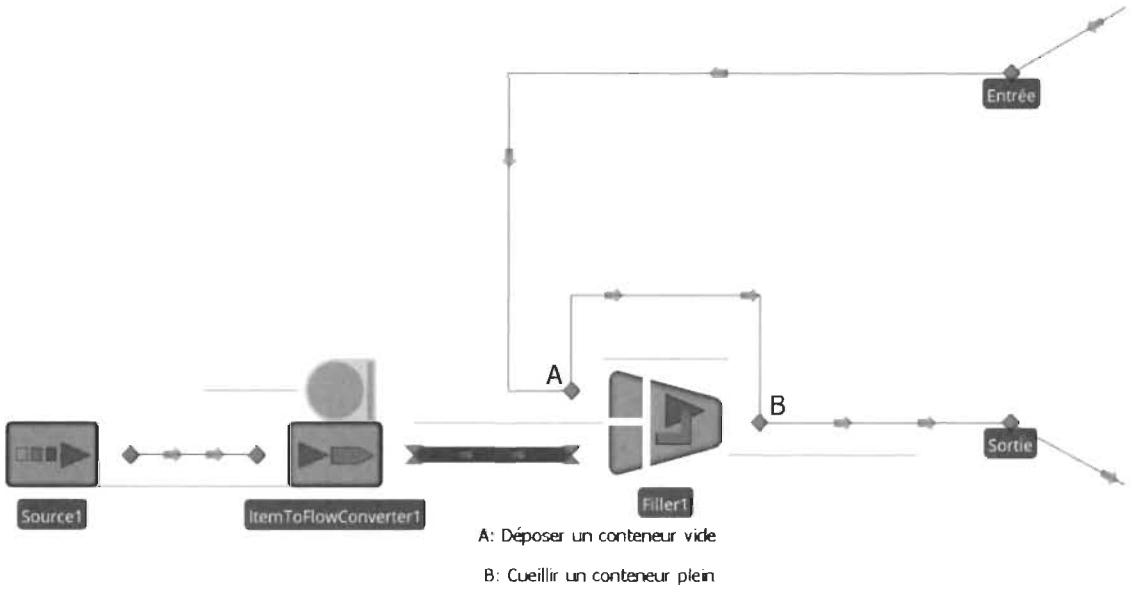


Figure 3.21 Modèle implanté au site d'un client

Afin d'implanter le modèle au site des centres de transbordement, l'objet « Station » est utilisé pour les dépôts de conteneurs ainsi que les files d'attente. Pour les balances, les objets « Timepath » et « Resource » sont utilisés. De la même manière, les objets « Emptier », « Server », « Tank » et « Filler » sont utilisés respectivement pour simuler le déchargement des camions dans l'espace de déchargement, la chargeuse, le dépôt des matières résiduelles et la pelle mécanique. Les figures 3.22 et 3.23 représentent respectivement les modèles d'un centre de transbordement et l'usine de tri et de traitement implantés sur le logiciel Simio.

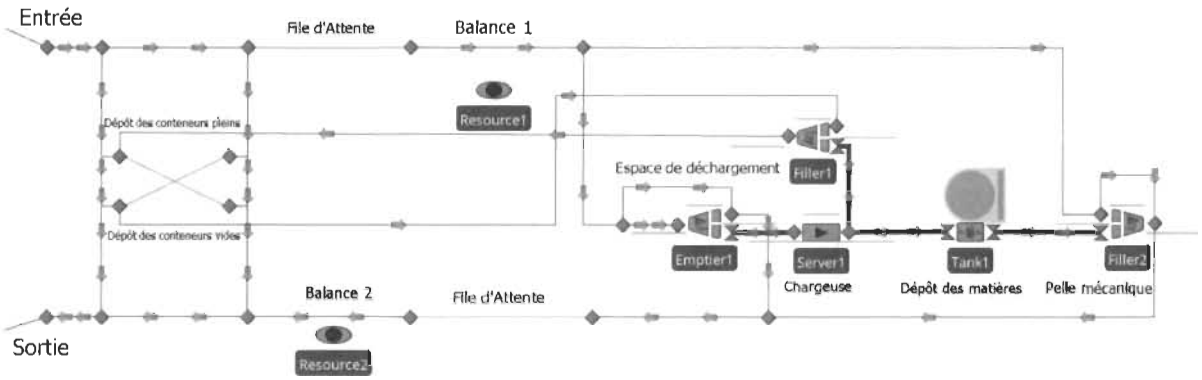


Figure 3.22 Modèle implanté au centre de transbordement

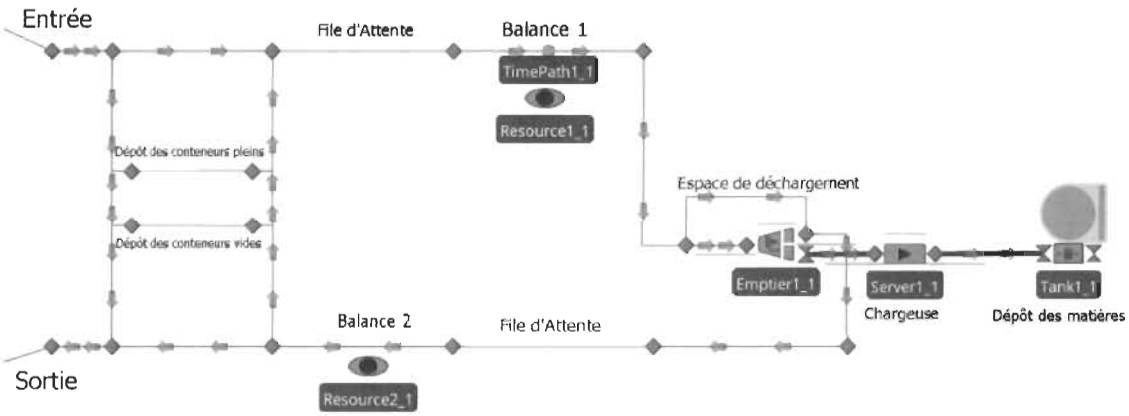


Figure 3.23 Modèle implanté à l'usine de tri et de traitement

Au cours de cette étude, une instance réfère à une liste de tâches de transport à effectuer par les camions internes dans une journée de travail et elle est générée aléatoirement. Une réplication réfère à la simulation d'une journée de travail sur la base d'une instance et des autres paramètres en intrant. Un scénario est la simulation de plusieurs réplications ayant les mêmes paramètres stochastiques en intrant et différentes instances aléatoires afin de tenir en compte la variation intrinsèque présente dans les listes de tâches à faire. Il semble que la simulation durant 50 jours ouvrables des activités de l'entreprise partenaire selon un seul scénario est suffisante pour avoir une valeur moyenne à chacun des indicateurs de performance qui soit représentative de 260 jours ouvrables de l'année.

Le modèle de simulation fonctionne sur la base d'une liste de tâches ne transport, de sorte que le modèle doit respecter l'ordre des tâches de la liste lors de l'allocation du prochain camion interne libre. C'est la liste des tâches qui varie d'une journée à l'autre. De ce fait, une réplication du modèle qui représente une journée de travail consiste en une liste de tâches uniques et ce sont les listes de tâches qui varient d'une réplication à l'autre pour représenter la variation des listes de tâches. Le tableau 3.9 présente le format de cette liste de tâches avec l'identité du client et le type de tâche.

Tableau 3.9 Exemple d'une liste de tâches en transport

Numéro de tâche	Client	Type de tâche
1	2029	3
2	1013	2
3	3006	1

La génération des instances sur les clients à desservir quotidiennement doit être de sorte que la simulation de 50 jours représente une bonne variation en nombre et localisation des clients. Autrement dit, il faut générer une variation de la charge de travail au plus proche de la réalité. Cela a été fait en réalisant un programme écrit en langage de programmation VBA qui génère une matrice de clients, une matrice de types de tâches et une matrice de l'ordre de tâches. Ayant pour objectif de créer cette variation, la phase de génération des instances dans le cadre de trois matrices, se déroule au début de procédure de la simulation. Chacune de ces trois matrices à 50 lignes représentant le nombre de réplications et 150 colonnes représentant l'identification des clients. Au départ de la simulation de chacun des scénarios, la valeur du paramètre R représentante le numéro de la réplication est de 1 et, selon la valeur de ce paramètre, les caractéristiques des instances sont choisies de la ligne numéro R de chacune des trois matrices. Ensuite, dans la période de réchauffement qui dure une demi-heure (de 5h00 à 5h30) au début de chacune des réplications, les paramètres du modèle de simulation de système s'ajustent, de sorte que l'état du modèle soit représentatif de l'état de système logistique réelle au début d'une journée de travail. Ensuite, la simulation se poursuit par l'allocation du premier camion de la flotte à la

première tâche de la liste, puis le deuxième camion à la seconde tâche et ainsi de suite, jusqu'à ce que la liste de tâche soit complétée. À la fin d'une réplication, la valeur de chaque extrant est enregistrée et une unité s'ajoute à la valeur du paramètre R. Ce processus se répète jusqu'à ce que le nombre de réplications (R) atteigne 50. Ensuite, pour chaque extrant la moyenne de ses 50 valeurs est calculée et enregistrée. Puis, une unité s'ajoute à la valeur du paramètre S et s'il existe encore un scénario, le scénario suivant est choisi et ses paramètres en intrant sont attribués. La figure 3.24 représente le pseudo-code du modèle de simulation pour les 50 réplications alors que le code est en Annexe 1.

3.3.1 Génération des instances aléatoires

Afin de générer une liste aléatoire de tâches selon le format présenté dans le tableau 3.6, un mécanisme de génération des instances aléatoires fut développé Les instances spécifient trois paramètres : le numéro de la tâche, l'origine du client et le type de tâche. Dans le modèle de simulation, les 60 tâches sont attribuées à parts égales à chaque territoire. Ensuite, un type de tâche est attribué à chacune des 20 tâches de chaque territoire, selon une proportion de 10% pour le type 1 (livraison), 80% pour le type 2 (échange) et 10% pour le type 3 (cueillette). Chaque territoire inclut 50 sites de clients. Les instances sont générées en attribuant une origine une tâche à la fois par territoire et de façon aléatoire selon une probabilité de 1 sur 50, soit un seul des 50 clients du territoire à chacune des 20 tâches du territoire. Les simulations effectuées consistent, au total, en 50 réplications de chacune des instances, et ce pour tous les scénarios. Suite aux simulations, la compilation par scénario de la moyenne des valeurs obtenues sur les 50 réplications est utilisée pour comparer les scénarios. Ayant pour objectif de générer les instances avec les caractéristiques mentionnées ci-dessus, trois matrices sont générées. La première matrice « clients » comprend les clients qui sont sélectionnés d'une façon aléatoire de chacun des territoires.

Pseudo-code du modèle de la simulation

Intrants : Valeurs des paramètres intrants, Numéro de réplication (R)
Extrants : Moyen de temps moyen d'attente, Moyen de temps moyen de service,
Moyen de coût total, Moyen de consommation totale, Moyen d'émission totale

```
Moyen de temps moyen d'attente ← 0;
Moyen de temps moyen de service ← 0;
Moyen de coût total ← 0;
Moyen de consommation totale ← 0;
Moyen d'émission totale ← 0;
Temps moyen d'attente ← 0;
Temps moyen de service ← 0;
Coût total ← 0;
Consommation totale ← 0;
Émission totale ← 0;
R ← 1;
Attribuer les valeurs aux paramètres intrants;
Générer une matrice aléatoire de clients (50x150);
Générer une matrice aléatoire de type de tâches (50x150);
Générer une matrice aléatoire de l'ordre des tâches (50x150);
   while R<51 do
       For i=1 to 150
        Client (i) ← Ligne R, colonne i de la matrice des clients;
       Type de tâche (i) ← Ligne R, colonne i de la matrice des types de tâches;
       Ordre de tâche (i) ← Ligne R, colonne i de la matrice de l'ordre des tâches ;
     Next (i)
     Période de réchauffement 5:00:00 - 05:30:00;
     Roulement de la simulation
     while Run.Time < 19:00:00 do
        Update Temps moyen d'attente ;
        Update Temps moyen de service;
        Update Coût total;
        Update Consommation totale;
        Update Émission totale;
     end
Update Moyen de temps moyen d'attente;
Update Moyen de temps moyen de service;
Update Moyen de coût total;
Update Moyen de consommation totale;
Update Moyen d'émission totale;
R ← R+1;
end
Return:
     Moyen de temps moyen d'attente;
     Moyen de temps moyen de service;
     Moyen de coût total;
     Moyen de consommation totale;
     Moyen d'émission totale
```

Figure 3.24 Pseudo-codes du modèle de simulation

Les lignes de cette matrice représentent le numéro des réplications et les colonnes représentent les clients. Les cellules peuvent avoir la valeur 0 ou 1, de sorte qu'une vingtaine de cellule ont une valeur de 1 qui représente le client sélectionné alors qu'une valeur de 0 représente un client non sélectionné. Les 0 et 1 sont générés de façon à ce que la somme soit de 20 clients sélectionnés pour chacun des groupes de colonnes 1 à 50, 51 à 100 et 101 à 150. La figure 3.25 représente le format de cette matrice.

	Territoire 1					Territoire 2			Territoire 3		
	Client 1	Client 2	Client 3	...	Client 50	Client 51	...	Client 100	Client 101	...	Client 150
Réplication 1	0	1	1	...	0	1	...	1	0	...	1
Réplication 2	Somme = 20					Somme = 20			Somme = 20		
. . .											
Réplication 50	1	0	1	...	1	1	...	0	1	...	0

Figure 3.25 Format de la matrice des clients

La deuxième matrice « type de tâches », qui est générée sur la base des données de la matrice de clients, a le même nombre de lignes et colonnes. Les lignes et colonnes représentent également le numéro des réplications et les clients, puis les valeurs de cellules représentent les types de tâches. Les types de tâches sont générés de façon aléatoire, en tenant compte que seulement les cellules qui ont la valeur 1 dans la matrice de clients prennent les valeurs 1, 2, 3 pour le type de la tâche, en respectant la distribution suivante : 10% de type 1, 80% de type2 et 10% de type 3. La figure 3.26 représente le format de cette matrice.

	Territoire 1					Territoire 2			Territoire 3		
	Client 1	Client 2	Client 3	...	Client 50	Client 51	...	Client 100	Client 101	...	Client 150
Réplication 1	0	3	1	...	0	2	...	3	0	...	2
Réplication 2	1: 10% 2: 80% 3: 10%					1: 10% 2: 80% 3: 10%			1: 10% 2: 80% 3: 10%		
. . .											
Réplication 50	2	0	3	...	2	1	...	0	2	...	0

Figure 3.26 Format de la matrice du type de tâches

La troisième matrice « ordre des tâches » est sous le même format que les deux matrices précédentes. Les valeurs de cette matrice sont générées de façon aléatoire et représentent l'ordre des tâches dans une instance. Les valeurs varient entre 1 et 60 et seulement les cellules qui ont la valeur 1 dans la matrice de clients ont une valeur dans cette matrice. La figure 3.27 représente le format de cette matrice.

	Territoire 1					Territoire 2			Territoire 3		
	Client 1	**Client 2**	**Client 3**	...	**Client 50**	**Client 51**	...	**Client 100**	**Client 101**	...	**Client 150**
Réplication 1	0	45	32	...	0	9	...	26	0	...	53
Réplication 2	De 1 à 60										
. . .											
Réplication 50	29	0	38	...	3	16	...	0	41	...	0

Figure 3.27 Format de la matrice de l'ordre des tâches

La valeur de propriété de « Stopping condition » de la source des matières CRD numéro n (client numéro n) est la donnée de la ligne « r » (numéro de réplication) et la colonne « n » de la matrice de clients (Matrice_Clients[run.replicationnumber,n]). De cette façon, les sources dont la celle correspondante à la matrice de clients est 1 produisent les matières du volume d'un conteneur et les sources dont la celle correspondante à la matrice de clients est 0 ne produisent aucune matière. De la même manière, la valeur de propriété de « Time Offset » de la source numéro n (client numéro n) est la donnée de la ligne « r » (numéro de réplication) et la colonne « n » de la matrice de l'ordre des tâches (Matrice_Ordre[run.replicationnumber,n]) multiplié par 0,5 minute. De cette façon, pendant 30 minutes de la période de réchauffement, à chacun de trente secondes et en ordre de la matrice de l'ordre, une source produit les matières d'un conteneur et donc une tâche s'ajoute à la liste des tâches des camions internes.

En résumé, les limitations appliquées par ce programme sur le modèle sont :

1. Nous avons l'intention de produire la même liste des tâches dans la réplication numéro r ($0 < r < 51$) des scénarios 1,2, …, 36.

2. Dans chaque territoire, il existe 50 clients (source d'entité), mais à chaque réplication seulement 20 sources créent une entité et 30 sources ne créent rien. Donc, on doit empêcher la 21e source à créer une entité.
3. Dans chaque territoire, l'attribution du type des tâches aux entités doit être d'une façon dont 10% des entités créées par 20 sources sont de type 1 (livraison), 80% sont de type 2 (échange) et 10% sont de type 3 (cueillette).
4. Au cas où aucune règle de répartition n'est appliquée, l'attribution des tâches aux camions doit s'assurer de distribuer équitablement la flotte de camions internes entre les territoires.

3.3.2 Période de réchauffement

Au cours de la période de réchauffement, qui s'étend de 5h00 et 5h30, l'état du modèle s'ajuste d'une manière à ce que le système de transport et manutention de l'entreprise dans le modèle de simulation ait le même état au début du chacun des jours de travail. Plus précisément, la création des conteneurs vides à l'ensemble de sites ainsi que les conteneurs pleins aux chantiers des clients dont le type est 2 (échange) ou 3 (cueillette) se fait lors de cette période. Aussi, les dépôts de matières résiduelles aux centres de transbordement sont remplis pour que les CRPM et les CTR puissent effectuer leurs tâches dès le début de la journée.

Comme discuté précédemment, une spécificité de ce système logistique est que la manutention commence aux sites des clients par la livraison de conteneur vide par la flotte de camions internes. Les camions ne livrent pas tous les conteneurs au début d'une journée et ils ne les ramassent pas tous à la fin de la journée. Donc, ils restent toujours des conteneurs aux sites des clients. De plus, le dépôt des matières résiduelles ainsi que le dépôt des conteneurs vides ne sont pas vides au début ou à la fin de la journée. Au cas où on commence la simulation sans période de réchauffement, un délai significatif sera requis pour approvisionner les conteneurs vides aux clients, remplir les conteneurs par clients, fournir les conteneurs vides aux sites de l'entreprise et remplir le dépôt des matières aux centres de transbordement.

3.3.3 Indicateurs de performance du modèle de simulation

Les résultats du modèle de simulation des divers scénarios (présentés subséquemment dans la section 4 et 5) sont mesurés et comparés au niveau de plusieurs indicateurs de performance, soit des temps d'opération, l'impact économique, la consommation de carburant et les impacts environnementaux.

3.3.3.1 Temps d'attente et temps de passage

Le temps d'attente de tous les camions est mesuré à partir du moment où le camion entre dans la file d'attente jusqu'au moment où il entre sur la balance. De plus, le temps de passage des camions aux divers sites est calculé à partir du moment où le camion entre dans la file d'attente d'un site jusqu'au moment où il sort du site. Ainsi, le temps de passage inclut le temps d'attente des camions dans une file d'attente et la réduction du temps d'attente va réduire le temps de passage. En outre, le temps de passage de chaque type de camion est mesuré séparément, car les opérations à effectuer peuvent varier d'un type de camion à l'autre.

3.3.3.2 Impact économique

Selon le département de la comptabilité de l'entreprise partenaire, l'utilisation d'un camion interne coûte environ 60 dollars canadiens par heure, autant pour les camions de type « *Roll-off* » ou « *Hook-lift* ». De plus, la sous-traitance d'un CRPM coûte 125 dollars canadiens par heure, tandis que ce coût est de 75 dollars canadiens par heure pour les CTR. Au niveau des camions externes, l'attente d'un camion dans la file n'entraîne aucun coût supplémentaire à l'entreprise partenaire. Par rapport aux équipements de manutention, le coût relatif aux chargeuses est de 65 dollars canadiens par heure pour chaque équipement tandis que ce taux est de 85 dollars canadiens par heure pour chaque pelle mécanique.

3.3.3.3 Consommation de carburant

La consommation de carburant est calculée sur la base de la quantité de carburant utilisé (en litre) en fonction du temps d'opération des camions et des équipements de manutention. Le taux de consommation d'un véhicule qui est en mouvement sur la route

diffère de celui en marche au ralenti dans la file d'attente à l'entrée d'un site de l'entreprise. Selon le rapport sur le marché des technologies automobiles présenté par le Département de l'énergie du gouvernement des États-Unis (2016), la consommation de carburant des camions de classe 7 incluant les camions internes et externes de ce mémoire est de 8 miles par gallon soit de 29,4 litres par 100 km. Ce paramètre est de 5 miles par gallon soit de 47,04 litres par 100 km pour les camions de classe 8b incluant les CRPM à cette étude. Sur la base des résultats de recherche de l'Institut de recherche ANL (2018), la consommation du moteur au ralenti d'un véhicule immobilisé pour l'ensemble des camions mentionnés à cette étude est de 1,15 gallon par heure soit 3,79 litres par heure. Au niveau des équipements de manutention mentionnés à ce mémoire, selon le rapport d'un manufacturière (Caterpillar, 2014), la consommation moyenne de carburant est de 12,5 litres par heure. Les données fournies par le tableau 3.10 représentent un résumé des taux de consommation de carburant utilisé dans ce mémoire pour les divers équipements de transport.

Tableau 3.10 Taux de consommation de carburant selon les équipements de transport

	Équipements de transport	Taux de consommation de carburant
1	Camions internes et CTR en route	29,4 (l/100km)
2	Camions internes, externes et CTR en marche au ralenti	3,79 (l/h)
3	CRPM en route	47,04 (l/100km)
4	CRPM en marche au ralenti	3,79 (l/h)
5	Équipements de manutention	12,5 (l/h)

3.3.3.4 Impacts environnementaux

Les émissions de GES sont calculées selon la méthodologie QC.27 sur la déclaration obligatoire de certaines émissions de contaminants dans l'atmosphère déterminée par le gouvernement du Québec (2015). Selon les auteurs, le calcul du niveau d'émission de CO_2 est fait selon l'équation 1.

Équation 1. Calcul d'émission de CO_2

$$CO_2 = \text{Combustible} \times FE \times 1000 \times 0{,}001$$

où :

- CO_2 : émissions de CO_2 attribuables à chaque type de combustible utilisé par les équipements mobiles, en tonnes métriques ;
- Combustible : volume du combustible utilisé par les équipements, en kilolitres;
- FE : facteur d'émission de CO_2 du combustible, tel qu'indiqué au tableau 3.5, en kilogrammes par litre ;
- Facteur de conversion des litres en kilolitres : 1000 ;
- Facteur de conversion des kilogrammes en tonnes métriques : 0,001.

De la même manière, les émissions de méthane (CH_4) et d'oxyde nitreux (N_2O) sont calculées sur la base de l'équation 2.

Équation 2. Calcul d'émission de CH_4 ou N_2O

$$CH_4 \text{ ou } N_2O = \text{Combustible} \times FE \times 1000 \times 0{,}000001$$

où :

- CH_4 ou N_2O : émissions de CH_4 ou de N_2O attribuables à chaque type de combustible utilisé par les équipements mobiles, en tonne métrique ;
- Combustible : volume du combustible utilisé par les équipements mobiles, en kilolitre ;
- FE : facteur d'émission de CH_4 ou de N_2O du combustible indiqué au tableau 3.5, en gramme par litre ;
- Facteur de conversion des litres en kilolitres : 1000 ;

- Facteur de conversion des grammes en tonnes métriques : 0,000001.

La quantité totale des émissions des GES en CO_2 équivalent est calculée selon la formule proposée par le règlement sur la déclaration obligatoire de certaines émissions de contaminants dans l'atmosphère déterminée par le gouvernement du Québec (2015), tel que présenté à l'équation 3.

Équation 3. Quantité totale des émissions de GES en CO_2 équivalent

$$CO_2\text{éq.} = \sum_{i=1}^{n} GES_i \; x \; PRP_i$$

Où :

- CO_2éq. : désigne les émissions annuelles de GES, en tonne métrique équivalente de CO_2 ;
- GES_i : désigne les émissions annuelles de chacun des GES émis, en tonne métrique ;
- PRP_i : désigne le potentiel de réchauffement planétaire mentionné à l'annexe A.1 du règlement sur la déclaration obligatoire de certaines émissions de contaminants dans l'atmosphère déterminé par le gouvernement du Québec (2015) (tableau 3.12), pour chaque GES émis ;
- n : nombre de GES émis ;
- i : type de GES.

Conformément à ce règlement, la quantité totale en équivalent CO_2 calculé est arrondie au nombre entier supérieur. Le tableau 3.11 présente les facteurs d'émission des équipements mobiles dont le type de combustible est le diesel, ce qui correspond au combustible utilisé par l'ensemble des équipements de transport et de manutention de ce mémoire.

Tableau 3.11 Facteurs d'émission selon le combustible de diesel

Équipements mobiles	**CO_2 (kg/l)**	**CH_4 (g/l)**	**N_2O (g/l)**
Véhicule ou machinerie au diesel	2,663	0,15	1,1

Tableau 3.12 Potentiel de réchauffement planétaire des gaz à effet de serre

Paramètre	**CO_2**	**CH_4**	**N_2O**
PRP	1	21	310

3.3.3.5 Durée d'exécution des tâches de transport

C'est important de connaître l'impact de la variation de diverses variables indépendantes sur la durée totale d'accomplissement de l'ensemble des opérations. Pour ce faire, le makespan est considéré comme une variable dépendante à cette étude. Le makespan est défini comme la période entre le moment du déploiement du premier camion interne afin d'accomplir la première tâche et le moment où les matières CRD sont déposées sur le dépôt de l'usine pour la dernière fois ou le moment où le dernier camion rentre au stationnement de centre de répartition. Celui qui survient le plus tard est considéré comme la fin du makespan.

3.3.4 Paramètres en intrant du modèle de simulation

Pendant la simulation, les tâches de la liste de tâches sont attribuées aux camions internes selon une règle de répartition. Dans les scénarios simulés, les indicateurs de performance sont étudiés en fonction de trois règles de répartitions suivantes :

1- ordre de la liste de tâches

Les tâches sont attribuées aux camions internes selon l'ordre de la réception de la commande de client. Autrement dit, c'est la règle du premier arrivé, premier servi.

2- distance la plus courte

Les tâches de la liste sont priorisées en fonction de la distance entre la localisation du camion libre et le site du client. Le site du client qui a la distance la plus courte avec le camion interne libre est celui qui est choisi.

3- distance la plus longue

Les tâches de la liste sont priorisées en fonction de la distance entre la localisation du camion libre et le site du client. Le site du client qui a la distance la plus longue avec le camion interne libre est celui qui est choisi.

La distance parcourue par les camions est calculée sur la base du système d'information géographique (SIG) du logiciel Simio. Le temps de déplacement est calculé en divisant la distance parcourue par la vitesse moyenne des camions. Puisque la majorité des distances parcourues par les camions est sur l'autoroute, la vitesse moyenne des camions internes est considérée de 75 km/h, tandis que la vitesse moyenne des CRPM et CTR est considérée de 65 km/h. Pour ce qui est des camions externes, on ne simule pas leur déplacement, mais seulement leur arrivée aux sites de l'entreprise partenaire, tel que présenté à la section 3.2.2.

Par rapport aux CTR, au territoire 1, ils font les transports aller-retour entre le centre de transbordement 1 et l'usine de tri et de traitement et au territoire 3, ils font les transports aller-retour entre le centre de transbordement 2 et l'usine de tri et de traitement. Dans la

simulation, ces transports sont modélisés sur la base d'une liste des tâches pour les CTR. Cette liste a seulement une colonne qui détermine l'origine des transports qui peut être le centre de transbordement 1 ou le centre de transbordement 2. La destination de toutes les tâches est l'usine de tri et de traitement. S'il existe des conteneurs à transporter à chacun des centres de transbordement, une origine s'ajoute à cette liste et le premier CTR libre se dirige vers l'origine précisée dans la liste. S'il n'existe pas un conteneur à transporter à chacun des centres de transbordement, les CTR libres se dirigent vers le stationnement du centre de répartition.

Dans ce mémoire, le taux d'arrivée des camions externes est considéré en deux états, de sorte que l'un est représentatif d'une journée d'achalandage normal et l'autre d'une journée d'achalandage fort. Au niveau de camions externes pour une journée dite normale, le taux d'arrivée des camions aux sites de l'entreprise partenaire est estimé en utilisant une distribution ajustée aux taux d'arrivée des camions observé dans la journée étudiée (tableau 3.8). Dans une journée avec un achalandage normal et sur la base des données collectées présentées dans les tableaux 3.2, 3.3 et 3.4, une moyenne de 28 camions externes arrivent à chacun des sites de l'entreprise partenaire (CT1, CT2 ou UTT) entre 5h30 et 16h00. En divisant 10,5 heures par 28 camions, un taux d'arrivée de 2,67 camions/heure est obtenu. Donc, une distribution exponentielle avec un intervalle moyen de 22,5 minutes entre chaque arrivée représente ce taux d'arrivée. La figure 3.28 représente ce taux d'arrivée pendant une journée de travail.

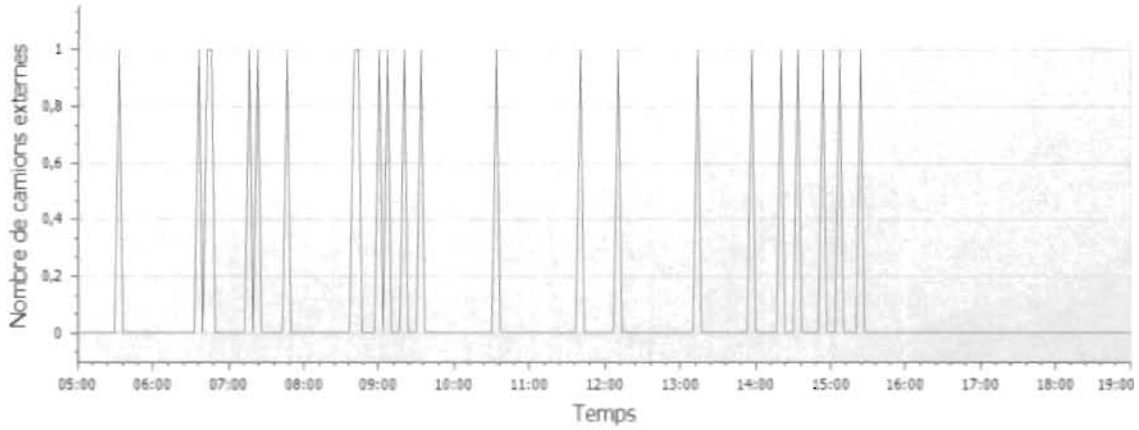


Figure 3.28 Taux d'arrivée des camions externes au niveau d'achalandage moyen

Selon le chef de répartiteurs, le nombre de camions externes arrivés à chacun des sites de l'entreprise ne dépasse pas 44. Donc, pour une journée avec un achalandage fort, la distribution exponentielle avec un intervalle moyen de 14,4 minutes (10,5 heures / 44 = 0,24 heures (14,4 minutes)) entre chaque arrivée et le nombre maximal de 44 camions externes est considérée. La figure 3.29 représente la distribution d'arrivage des camions externes dans une journée avec un achalandage fort.

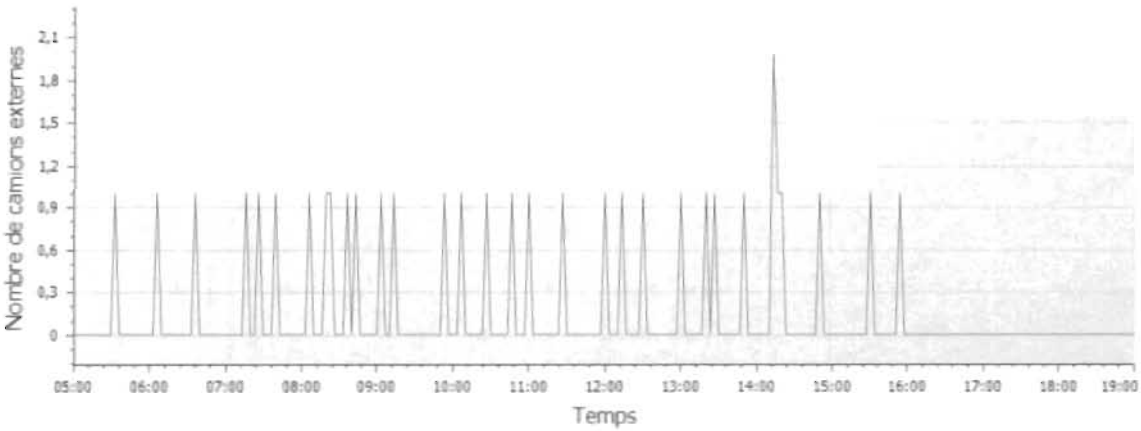


Figure 3.29 Taux d'arrivée des camions externes au niveau d'achalandage fort

Le tableau 3.13 présente un résumé des paramètres utilisés pour la simulation des deux approches logistiques.

Tableau 3.13 Résumé des paramètres intrants pour les deux approches logistiques simulées

	Paramètres intrants	**Modèle de la simulation du système logistique actuel**	**Modèle de la simulation du système logistique alternatif**
1	Temps de levage ou positionnement d'un conteneur	Roll-off: Beta (moyenne: 7,92 min)	Hook-lift : Triangulaire (3, 4, 5) min CTR : 2 * Triangulaire (3, 4, 5) min
2	Temps de passage sur les balances	Weibull (moyenne : 3,54 min)	Weibull (moyenne : 3,54 min)
3	Temps de déchargement par camions internes et externes	Lognormale (moyenne : 3,78 min)	Lognormale (moyenne :3,78 min)
4	Temps de chargement par CRPM	Gamma (Moyenne : 45,6 min)	
5	Temps de déchargement par CRPM	Gamma (Moyenne : 20,82 min)	
6	Temps de ramassage des matériaux par une chargeuse	Triangulaire (1, 2 ,3) min	Triangulaire (1, 2, 3) min
7	Temps de remplissage d'un conteneur par une chargeuse		Triangulaire (2, 3, 4) min
8	Coûts de transport par camions internes	Roll-off : 60 $/h	Hook-lift : 60 $/h
9	Coûts de transport par les CRPM / CTR	125 $/h	75 $/h
10	Coûts d'utilisation des équipements de manutention	Chargeuse : 65 $/h Pelle mécanique : 85 $/h	Chargeuse : 65 $/h Pelle mécanique : 85 $/h
11	Nombre d'équipements de manutention au CT1	Chargeuse : 1 Pelle mécanique : 1	Chargeuse : 1 Pelle mécanique : 1
12	Nombre d'équipements de manutention au CT2	Chargeuse : 1 Pelle mécanique : 1	Chargeuse : 1 Pelle mécanique : 1
13	Nombre des équipements de manutention à l'usine de tri	Chargeuse : 1	Chargeuse : 1
14	Nombre de camions internes	Roll-off : 30	Hook-lift : 30
15	Nombre de CRPM / CTR	CRPMs : 20	CTR : 8
16	Nombre de camions de service	0	6
17	Vitesse moyenne des camions internes (km/h)	Roll-off : 75	Hook-lift : 75
18	Vitesse moyenne de CRPM /CTR (km/h)	CRPM : 65	CTR : 65
19	Vitesse moyenne de camions de service		25
20	Capacité équivalente de la zone de manutention	5	
21	Capacité de CRPM	160 verges cubes (8 conteneurs 20 v^3 / 4 conteneurs 40 v^3)	

3.3.5 Vérification et validation du modèle de simulation

Avant d'évaluer les résultats et les différents scénarios de simulation, le modèle de simulation a été calibré de sorte que son comportement ressemble au fonctionnement actuel du système réel. Le modèle a été validé pour les mesures suivantes, à savoir le taux d'arrivées de camions internes et externes aux divers sites de l'entreprise, le temps moyen d'attente dans les files aux entrées et le temps moyen de passage des camions internes, externes et CRPM aux sites. Un test t ($\alpha = 0,05$) a été effectué pour valider ces mesures. Le tableau 3.14 représente le nombre de camions internes arrivées aux sites de l'entreprise dans l'observation sur le terrain et la simulation. Les tableaux 3.15 et 3.16 résument aussi les résultats du test statistique. La valeur-p est supérieure à 0,05, ce qui confirme que le modèle de simulation n'est pas statistiquement différent du système réel.

Tableau 3.14 Nombre de camions internes arrivées dans l'observation et simulation

	CT1		CT2		UTT	
	Observé	Simulé	Observé	Simulé	Observé	Simulé
6h - 7h	3	2	1	2	3	2
7h - 8h	4	5	4	5	2	3
8h - 9h	2	3	5	3	2	2
9h - 10h	3	2	2	2	5	3
10h - 11h	4	5	2	3	4	3
11h - 12h	3	3	1	2	1	1
12h - 13h	1	1	2	1	1	2
13h - 14h	1	2	1	3	2	2
14h - 15h	2	3	0	1	1	1
15h - 16h	1	0	0	0	0	1
Taux d'arrivée	2,18	2,6	1,64	2,2	1,91	2

Tableau 3.15 Résultats de test T au niveau de taux d'arrivée et temps d'attente

Mesure	CT1			CT2			UTT		
	Simulé	Observé	Valeur p	Simulé	Observé	Valeur p	Simulé	Observé	Valeur p
Taux d'arrivée des camions internes	2,6	2,18	0,391	2,2	1,64	0,295	2	1,91	0,437
Temps moyen d'attente dans la file	0,65	0,81	0,366	0,93	0,96	0,44	1,11	1,19	0,419

Tableau 3.16 Résultats de test T au niveau de temps moyen de passage

Mesure	Simulé	Observé	Valeur P
Temps moyen de passage (Camions internes)	1,91	1,79	0,36
Temps moyen de passage (Camions externes)	1,05	1,01	0,29
Temps moyen de passage (Camions CRPM)	0,8	0,72	0,41

De plus, une animation de l'ensemble des scénarios a été effectuée. De cette façon, il est possible de constater en temps réel la séquence des opérations ainsi que la trajectoire des flux de matières et véhicules. Les animations ont été présentées au personnel de l'entreprise partenaire pour fin de validation des déplacements observés. La figure 3.30 représente plusieurs vues de cette animation.

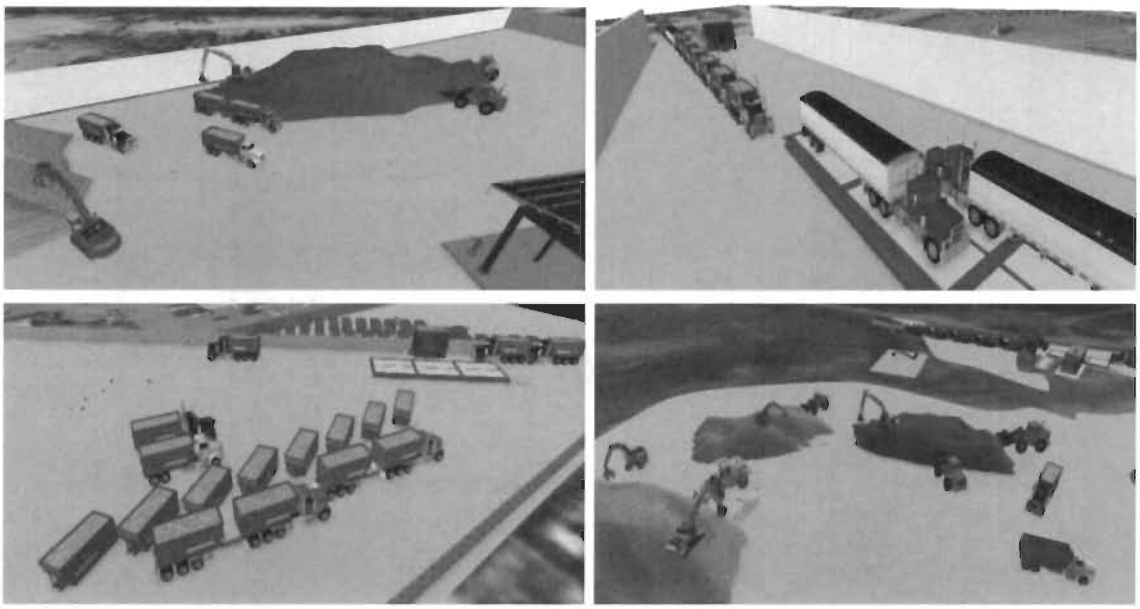


Figure 3.30 Diverses vues de l'animation du modèle de simulation

3.4 Conception du plan d'expérience

Les scénarios de la simulation sont conçus d'une manière à ce que l'on peut évaluer l'impact de la variation des paramètres des joueurs principaux du système logistique de cette chaine, y compris les camions internes, les camions externes, les CTR et la capacité des conteneurs sur les mesures de performances. À cette fin, comme présenté à la figure 3.31, l'impact de la capacité des conteneurs est évalué à deux niveaux, soit 20 et 40 verges. L'impact du niveau d'achalandage des camions externes est évalué au niveau de normal (ou moyen) et fort. L'impact de la mise en œuvre du système logistique actuel et celui proposé avec une capacité des CTR de 2 et 3 conteneurs. Finalement, l'impact de la règle de répartition des camions internes est évalué selon les trois règles de répartitions suivantes : l'ordre de la liste de tâches, la distance la plus courte et la distance la plus longue.

Malgré que l'entreprise partenaire utilise majoritairement des conteneurs de capacité de 40 verges cubes, une évaluation de l'impact de la capacité des conteneurs sur les mesures de performance a été réalisé.

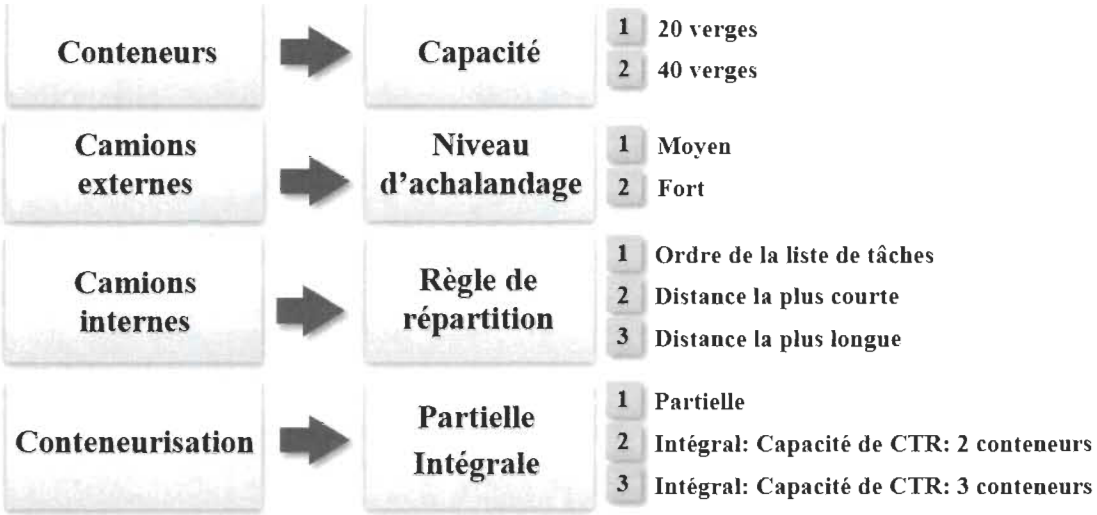


Figure 3.31 Paramètres variés au cours de la simulation des divers scénarios

Par conséquent, 36 scénarios sont définis pour comparer les systèmes logistiques actuel et alternatif, dans le but d'évaluer la sensibilité de ces deux systèmes à la variation des paramètres mentionnés. Le tableau 3.17 présente le plan d'expérience conçu.

Tableau 3.17 Plan d'expérience

N	Approche logistique	Capacité des conteneurs (verges)	Niveau d'achalandage	Règle de répartition
1	Actuelle	20	Moyen	Ordre de la liste
2	Actuelle	20	Moyen	Distance la plus courte
3	Actuelle	20	Moyen	Distance la plus longue
4	Actuelle	20	Fort	Ordre de la liste
5	Actuelle	20	Fort	Distance plus courte
6	Actuelle	20	Fort	Distance plus longue
7	Actuelle	40	Moyen	Ordre de la liste
8	Actuelle	40	Moyen	Distance la plus courte
9	Actuelle	40	Moyen	Distance la plus longue
10	Actuelle	40	Fort	Ordre de la liste
11	Actuelle	40	Fort	Distance plus courte
12	Actuelle	40	Fort	Distance plus longue
13	Proposée (2)	20	Moyen	Ordre de la liste
14	Proposée (2)	20	Moyen	Distance la plus courte
15	Proposée (2)	20	Moyen	Distance la plus longue
16	Proposée (2)	20	Fort	Ordre de la liste
17	Proposée (2)	20	Fort	Distance plus courte
18	Proposée (2)	20	Fort	Distance plus longue
19	Proposée (2)	40	Moyen	Ordre de la liste
20	Proposée (2)	40	Moyen	Distance la plus courte
21	Proposée (2)	40	Moyen	Distance la plus longue
22	Proposée (2)	40	Fort	Ordre de la liste
23	Proposée (2)	40	Fort	Distance plus courte
24	Proposée (2)	40	Fort	Distance plus longue
25	Proposée (3)	20	Moyen	Ordre de la liste
26	Proposée (3)	20	Moyen	Distance la plus courte
27	Proposée (3)	20	Moyen	Distance la plus longue
28	Proposée (3)	20	Fort	Ordre de la liste
29	Proposée (3)	20	Fort	Distance plus courte
30	Proposée (3)	20	Fort	Distance plus longue
31	Proposée (3)	40	Moyen	Ordre de la liste
32	Proposée (3)	40	Moyen	Distance la plus courte
33	Proposée (3)	40	Moyen	Distance la plus longue
34	Proposée (3)	40	Fort	Ordre de la liste
35	Proposée (3)	40	Fort	Distance plus courte
36	Proposée (3)	40	Fort	Distance plus longue

CHAPITRE 4 COMPARAISON DES DEUX SYSTÈMES LOGISTIQUES

Parmi les 36 scénarios définis dans la section 3.5, le scénario numéro 7 est celui qui se déroule quotidiennement (système logistique actuel) et le scénario numéro 31 est celui qui est escompté après avoir mis en œuvre le système logistique proposé. Dans ce chapitre, les valeurs moyennes de ces deux scénarios, qu'on nommera respectivement scénario de référence et scénario alternatif, seront comparés en termes du temps d'attente des camions aux entrées des sites de l'entreprise, du temps de passage aux sites de l'entreprise, des coûts de transport et de manutention, de consommation de carburant et des émissions de GES. Les autres scénarios ont été générés afin d'évaluer la sensibilité des systèmes logistiques actuel et proposé aux divers paramètres et sont analysés dans le chapitre 5. De plus, puisque la moyenne n'est pas une mesure statistique fiable, car elle est influencée par les valeurs extrêmes, les intervalles de confiance des résultats de simulation de tous les 36 scénarios seront présentés dans la section 5.3.

4.1 Résultats en termes du temps moyen d'attente

Les résultats de la simulation du scénario de référence et du scénario alternatif indiquent qu'il y a une réduction significative au niveau du temps d'attente moyen de l'ensemble des camions aux files d'attente de divers sites de l'entreprise. En effet, comme illustré dans la figure 4.1, ce temps passe de 0,65 heure à 0,02 heure au centre de transbordement 1, de 0,93 heure à 0,08 heure au centre de transbordement 2 et de 1,11 heures à 0,21 heures à l'usine de tri et de traitement, ce qui représente une diminution de 96,92%, 91,4% et 81,08%, respectivement. Grâce à la nouvelle approche logistique, les files d'attente aux entrées des sites ont quasiment disparu, car seuls les camions de service sont sujets à une attente.

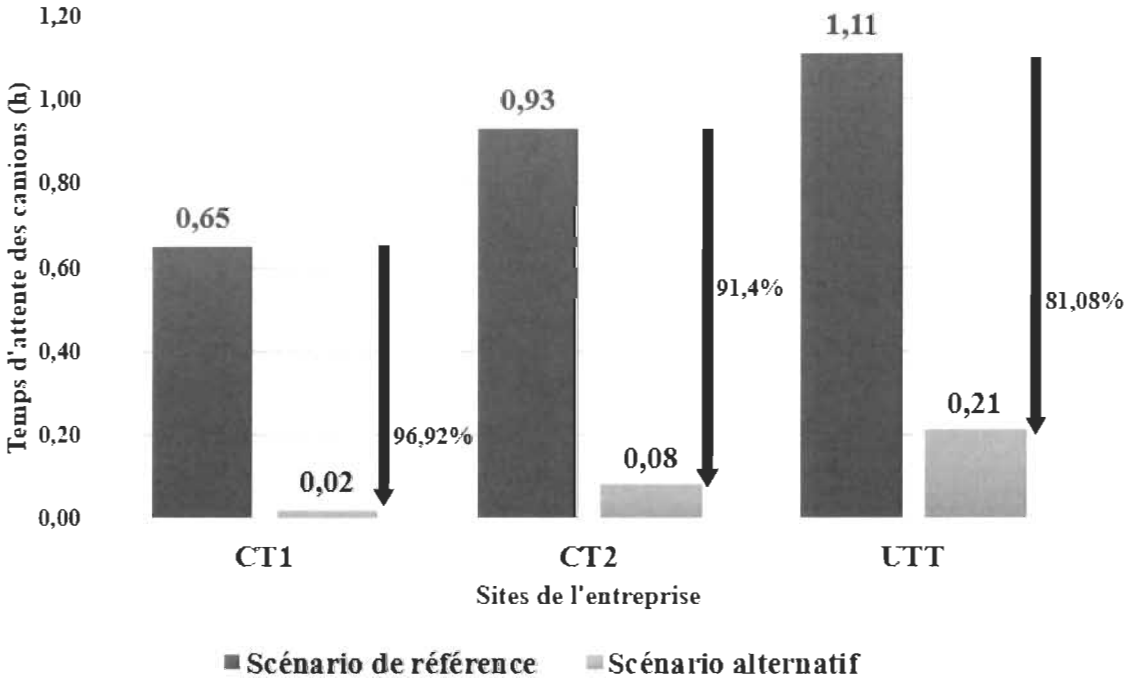


Figure 4.1 Résultats au niveau du temps moyen d'attente dans les files

4.2 Résultats en termes du temps moyen de passage

Aux sites de l'entreprise, pour le scénario alternatif, les camions internes échangent leurs conteneurs pleins par les conteneurs vides dans une période de temps plus courte et sans avoir besoin d'attendre dans les files. Le résultat de cette approche est une réduction de 93,72% de temps moyen de passage aux divers sites de l'entreprise. Quant aux camions externes, étant donné que la longueur de la file d'attente aux entrées des sites a significativement diminué, le temps de passage de ce type de camions dans le scénario alternatif subit une réduction de 67,62%. Pour les CRPM, dans le scénario de référence, le temps de passage moyen est 0,8 heure. Cette réduction découle des opérations d'échange de conteneurs et que les CTR n'attendent pas dans les files aux entrées de sites. La figure 4.2 représente une comparaison du temps de passage des camions pour les scénarios de référence et alternatif.

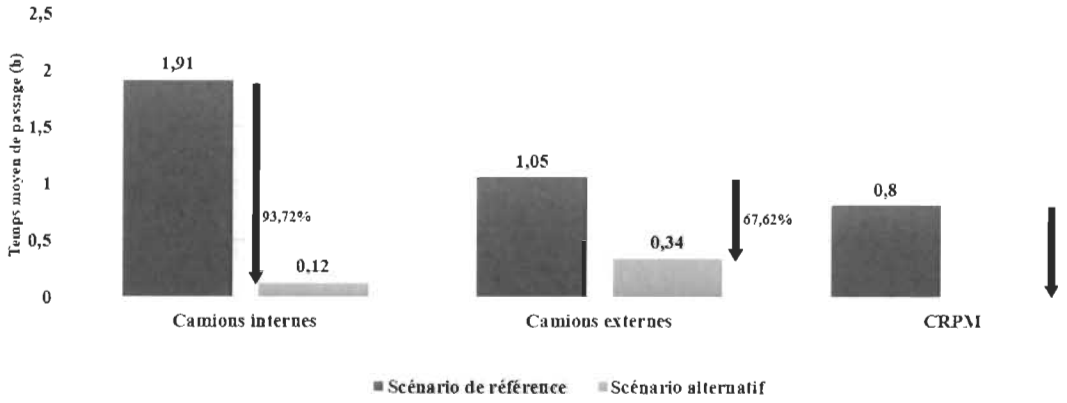


Figure 4.2 Résultats au niveau du temps moyen de passage des camions

4.3 Résultats en termes des aspects financiers

En ce qui concerne les coûts de transport et manutention de l'entreprise, les résultats des calculs effectués au cours de la simulation par Simio sur la base des valeurs des paramètres en intrant (tableau 3.13), démontrent que la mise en place de la nouvelle approche logistique augmente les coûts de transport des camions internes de 3%, car ils doivent décharger leurs conteneurs pleins dans la zone d'échange des sites qui se situe à un kilomètre de la zone de déchargement de l'entreprise. Par contre, la nouvelle approche réduit de 93,88% les coûts relatifs au temps de passage des camions internes aux sites de l'entreprise. Bien que l'approche alternative élimine les coûts du transport et ceux du passage de CRPM (au total 14688,79 $CA), il ajoute les coûts du transport et ceux du passage des CTR et camions de service (au total 7574,9 $CA). Il entraîne également une réduction de 10,33% au niveau des coûts des équipements de manutention. La figure 4.3 représente une comparaison entre les deux approches (scénarios 7 et 31) au niveau des coûts.

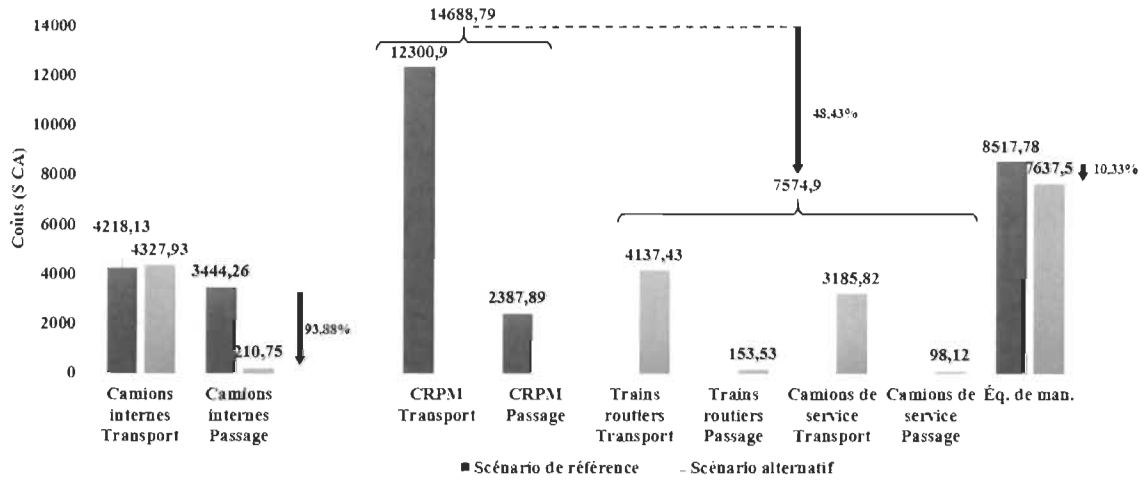


Figure 4.3 Comparaison des coûts d'utilisation des équipements pour les deux scénarios

4.4 Résultats en termes de la consommation de carburant

La consommation de carburant des camions internes dans l'approche proposée a connu une baisse de 18,59%. De la même manière, cette approche entraîne une réduction de 67,8% au niveau de la consommation des camions externes. Puisque le nombre de transports des CTR et camions de service est beaucoup plus nombreux que celui des CRPM, la consommation de carburant des CTR et camions de service (464,75litres) est supérieure que celle des CRPM (461,88litres). Par contre, au niveau des équipements de manutention, la nouvelle approche entraîne une réduction de 50,14% de consommation de carburant. La Figure 4.4 représente les résultats de la simulation au niveau de la consommation de carburant.

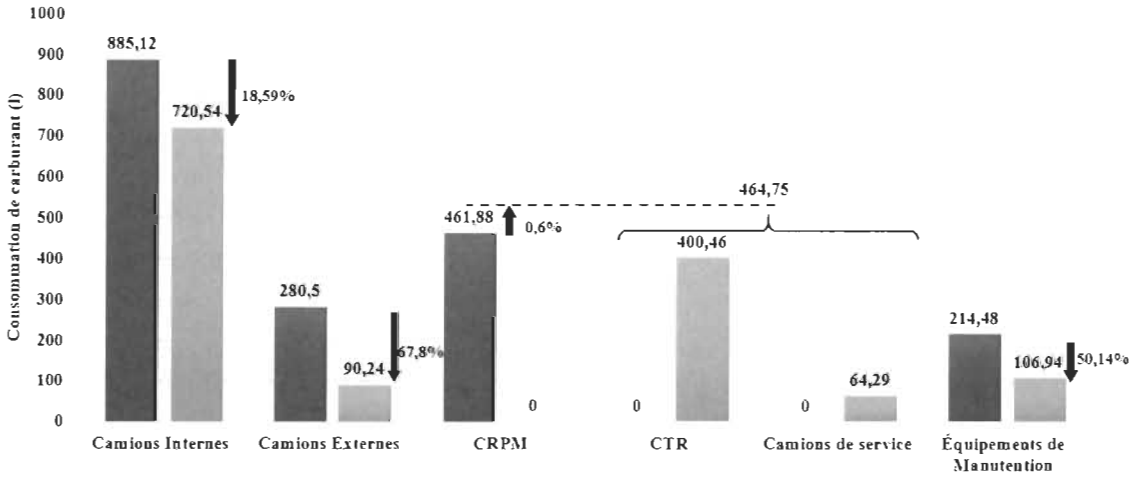


Figure 4.4 Comparaison de la consommation de carburantdes équipements pour les deux scénarios

4.5 Résultats en termes des émissions de GES

En termes d'émissions des GES, l'approche proposée entraîne respectivement une réduction de 18,6%, 67,85% et 50,23% au niveau des camions internes, camions externes et les équipements de manutention. C'est seulement au niveau des émissions des CTR et des camions de service (1,393 tCO_2éq) que l'on observe une augmentation par rapport à celle des CRPM (1,389 tCO2éq). Cette augmentation de 0,29% découle du nombre de transports effectués par les CTR et camions de service en comparaison aux CRPM. La Figure 4.5 représente la comparaison des résultats de la simulation au niveau des émissions de GES pour les deux scénarios.

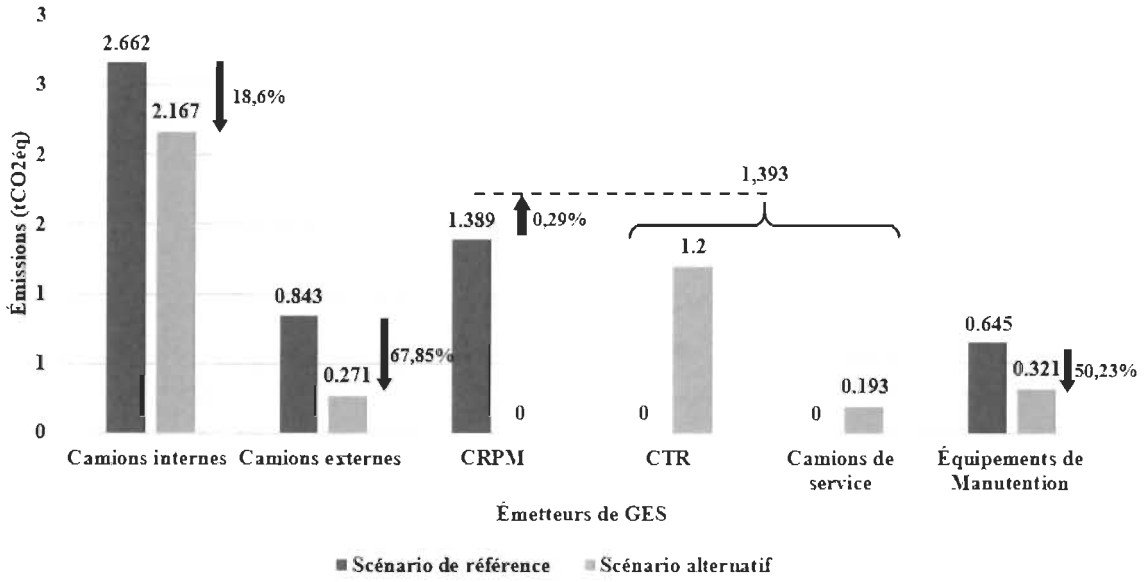


Figure 4.5 Comparaison des émissions de GES

des équipements pour les deux scénarios

4.6 Comparaison générale des deux scénarios

En somme, et comme illustré dans la Figure 4.6, les résultats présentés dans les sections précédentes indiquent que, comparativement au scénario actuel, le scénario alternatif permet de réduire les coûts de 36,02%, la consommation de carburant de 24,95% et les émissions de GES de 24,95%. Ceci se traduit par des économies quotidiennes estimées à 11117,8 $CA, soit environ deux millions de dollars annuellement (260 jours/année x 11117,8 $/jour = 2 890 628$/année). La réduction quotidienne de la consommation de carburant est estimée à 459 litres, soit 119 340 litres par année. Finalement, en termes des émissions de GES, la réduction quotidienne est estimée à 1,382 tCO_2éq, tandis que la réduction annuelle serait de 359,32 tCO_2éq.

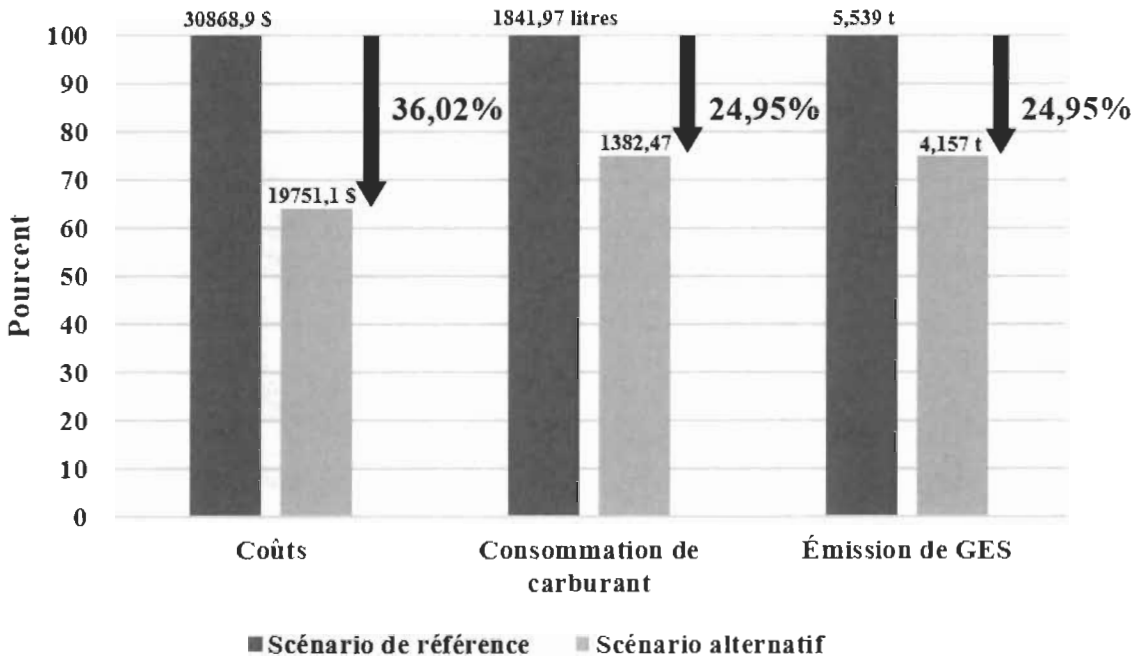


Figure 4.6 Comparaison des indicateurs de performance des deux scénarios, en pourcentage

CHAPITRE 5 ANALYSE DE RÉSULTATS

Les résultats de la simulation des scénarios 7 et 31 ont montré que si le système logistique actuel est remplacé par l'approche proposée, cela entraîne une réduction significative selon diverses mesures de performance. Cependant, des questionnements demeurent sur la sensibilité des systèmes aux divers paramètres en intrant et de la stratégie de transition du système actuel au celui proposé.

Dans ce chapitre, les résultats de l'ensemble des scénarios seront présentés en deux catégories. Dans la première, le système logistique actuel et celui proposé seront comparés dans le cadre de vingt-quatre premiers scénarios en transportant et traitant le même volume des matières résiduelles. De cette façon la comparaison des deux systèmes logistiques au niveau de divers résultats, particulièrement au niveau de makespan sera plus juste. Dans la deuxième catégorie, la capacité des deux systèmes logistiques sera comparée en traitant toutes les matières résiduelles arrivées aux sites de l'entreprise.

Ensuite, plusieurs analyses sont faites afin de déterminer le nombre optimal des camions de service et CTR qui peuvent être utilisés pour effectuer les activités de transport des conteneurs dans une journée de travail.

Finalement, considérant qu'un changement instantané entre les deux systèmes logistiques est une utopie, qu'en est-il d'une transition graduelle entre les deux systèmes. Spécifiquement, on cherche à répondre aux questions suivantes :

1. Quels sont les impacts de recourir aux deux approches mentionnées en même temps ?

2. Quelle est la meilleure stratégie de transition ?

5.1 Résultats de la simulation des scénarios

Comme mentionné précédemment, le volume des matières résiduelles diffère d'un scénario à l'autre en raison de la variation au niveau de l'achalandage des camions

externes et de la capacité des conteneurs. Au cas où le niveau d'achalandage est fort et/ou la capacité des conteneurs est de 20 verges cubes, il faut davantage de camions pour transporter les mêmes volumes à l'usine de tri et de traitement. Pour éclaircir ce point, le nombre de conteneurs et le volume des matières transportées ainsi que le nombre des CRPM requis et leurs capacités en nombre de conteneurs sont présentés dans la figure 5.1.

Afin de comparer les deux systèmes logistiques au niveau de divers paramètres, il faut que cette comparaison se fasse en effectuant la même charge de travail pour l'ensemble des scénarios. Pour ce faire, l'accomplissement de transport et traitement du volume minimal de 2880 verges cubes est considéré comme critère d'arrêt de la simulation. Le tableau 5.1 représente les résultats de la simulation de 36 scénarios en transportant et traitant le volume de 2880 v^3 au niveau du temps moyen d'attente dans les files aux entrées et le temps moyen de passage aux sites de l'entreprise. De la même manière, le tableau 5.2 représente les résultats de la simulation au niveau du coût, de la consommation de carburant, des émissions de GES et du makespan.

			Cont.	Nb. de CRPM x Cap. de CRPM		Cont. Transportés à l'UTT		
Conteneur 20 verges Achalandage moyen Scénarios: 1, 2, 3	CT1	Cam. Int	20	6 CRPM x 8 →		48		
		Cam. Ext	28					
	CT2	Cam. Int	20	6 CRPM x 8 →		48		
		Cam. Ext	28					
	Camions qui se dirigent directement à l'UTT →			Cam. Int	20	48		
				Cam. Ext	28		**Cap. de cont.**	**Vol. de matières transportées (V^3)**
					Total	144	20	2880
			Cont.	**Nb. de CRPM x Cap. de CRPM**		**Cont. Transportés à l'UTT**		
Conteneur 20 verges Achalandage fort Scénarios: 4, 5, 6	CT1	Cam. Int	20	8 CRPM x 8 →		64		
		Cam. Ext	44					
	CT2	Cam. Int	20	8 CRPM x 8 →		64		
		Cam. Ext	44					
	Camions qui se dirigent directement à l'UTT →			Cam. Int	20	64		
				Cam. Ext	44		**Cap. de cont.**	**Vol. de matières transportées (V^3)**
					Total	192	20	3840
			Cont.	**Nb. de CRPM x Cap. de CRPM**		**Cont. Transportés à l'UTT**		
Conteneur 40 verges Achalandage moyen Scénarios: 7, 8, 9	CT1	Cam. Int	20	12 CRPM x 4 →		48		
		Cam. Ext	28					
	CT2	Cam. Int	20	12 CRPM x 4 →		48		
		Cam. Ext	28					
	Camions qui se dirigent directement à l'UTT →			Cam. Int	20	48		
				Cam. Ext	28		**Cap. de cont.**	**Vol. de matières transportées (V^3)**
					Total	144	40	5760
			Cont.	**Nb. de CRPM x Cap. de CRPM**		**Cont. Transportés à l'UTT**		
Conteneur 40 verges Achalandage fort Scénarios: 10, 11, 12	CT1	Cam. Int	20	16 CRPM x 4 →		64		
		Cam. Ext	44					
	CT2	Cam. Int	20	16 CRPM x 4 →		64		
		Cam. Ext	44					
	Camions qui se dirigent directement à l'UTT →			Cam. Int	20	64		
				Cam. Ext	44		**Cap. de cont.**	**Vol. de matières transportées (V^3)**
					Total	192	40	7680

Figure 5.1 Volume des matières transportées aux divers scénarios

Tableau 5.1 Comparaison de scénarios en traitant le même volume des matières résiduelles

Sc.	Cam. Int.	Cam. Ext.	Nb. de cont.	Cap. de cont.	Vol. des matières traitées	Niv. D'ach.	Règle de rép.	Variables dépendantes (Résultats)									
								Temps d'attente (h)						Temps de passage (unité)			
								CT1		CT2		UTT		Cam. Int.		Cam. Ext.	
								Moyen	É-T	Moyen	É-T	Moyen	É-T	Moyen	É-T	Moyen	É-T
1	60	84	144	20	2880	M	R1	0,7	0,15	0,96	0,18	1,21	0,17	1,93	0,09	1,07	0,11
2	60	84	144	20	2880	M	R2	0,98	0,13	0,85	0,16	1,46	0,14	2,03	0,08	1,18	0,1
3	60	84	144	20	2880	M	R3	0,44	0,13	1,53	0,13	1,23	0,22	2,03	0,08	1,04	0,07
4	60	84	144	20	2880	F	R1	1,28	0,23	1,63	0,22	2,42	0,32	2,44	0,12	2,2	0,11
5	60	84	144	20	2880	F	R2	1,49	0,24	1,75	0,23	2,61	0,2	2,61	0,13	2,34	0,12
6	60	84	144	20	2880	F	R3	1,13	0,22	2	0,19	2,63	0,31	2,91	0,13	2,11	0,12
7	30	42	72	40	2880	M	R1	0,65	0,12	0,93	0,18	1,11	0,21	1,91	0,08	1,05	0,1
8	30	42	72	40	2880	M	R2	0,9	0,12	0,82	0,13	1,21	0,15	2,02	0,08	1,16	0,08
9	30	42	72	40	2880	M	R3	0,44	0,13	1,44	0,14	1,33	0,27	1,95	0,09	1,04	0,1
10	30	42	72	40	2880	F	R1	1,26	0,24	1,61	0,17	2,18	0,34	2,44	0,13	2,14	0,11
11	30	42	72	40	2880	F	R2	1,44	0,22	1,72	0,18	2,26	0,26	2,61	0,12	2,26	0,12
12	30	42	72	40	2880	F	R3	1,09	0,24	1,95	0,18	2,52	0,36	2,85	0,11	2,07	0,12
13	60	84	144	20	2880	M	R1	0,02	0,03	0,08	0,04	0,21	0,02	0,12	0,02	0,34	0,03
14	60	84	144	20	2880	M	R2	0,02	0,03	0,08	0,04	0,21	0,02	0,12	0,02	0,34	0,03
15	60	84	144	20	2880	M	R3	0,02	0,03	0,06	0,04	0,21	0,02	0,13	0,02	0,34	0,03
16	60	84	144	20	2880	F	R1	0,14	0,11	0,19	0,11	0,31	0,04	0,12	0,05	0,54	0,03
17	60	84	144	20	2880	F	R2	0,15	0,12	0,2	0,1	0,31	0,04	0,12	0,05	0,54	0,06
18	60	84	144	20	2880	F	R3	0,14	0,12	0,19	0,09	0,31	0,04	0,13	0,05	0,54	0,04
19	30	42	72	40	2880	M	R1	0,02	0,03	0,08	0,04	0,21	0,02	0,12	0,02	0,34	0,01
20	30	42	72	40	2880	M	R2	0,02	0,03	0,08	0,04	0,21	0,02	0,12	0,02	0,34	0,01
21	30	42	72	40	2880	M	R3	0,02	0,03	0,06	0,04	0,21	0,02	0,13	0,02	0,34	0,01
22	30	42	72	40	2880	F	R1	0,14	0,11	0,19	0,11	0,31	0,04	0,12	0,05	0,54	0,07
23	30	42	72	40	2880	F	R2	0,15	0,12	0,2	0,1	0,31	0,04	0,12	0,05	0,54	0,04
24	30	42	72	40	2880	F	R3	0,14	0,12	0,19	0,09	0,31	0,04	0,13	0,05	0,54	0,07
25	60	84	144	20	2880	M	R1	0,02	0,02	0,08	0,05	0,21	0,02	0,12	0,02	0,34	0,03
26	60	84	144	20	2880	M	R2	0,02	0,02	0,08	0,05	0,21	0,02	0,12	0,02	0,34	0,02
27	60	84	144	20	2880	M	R3	0,02	0,03	0,07	0,04	0,21	0,02	0,13	0,02	0,34	0,03
28	60	84	144	20	2880	F	R1	0,13	0,1	0,2	0,11	0,32	0,04	0,12	0,06	0,54	0,06
29	60	84	144	20	2880	F	R2	0,14	0,1	0,2	0,11	0,31	0,04	0,12	0,06	0,54	0,06
30	60	84	144	20	2880	F	R3	0,13	0,1	0,18	0,1	0,32	0,04	0,13	0,05	0,54	0,06
31	30	42	72	40	2880	M	R1	0,02	0,02	0,08	0,05	0,21	0,02	0,12	0,02	0,34	0,03
32	30	42	72	40	2880	M	R2	0,02	0,02	0,08	0,05	0,21	0,02	0,12	0,02	0,34	0,02
33	30	42	72	40	2880	M	R3	0,02	0,02	0,07	0,04	0,21	0,02	0,13	0,02	0,34	0,02
34	30	42	72	40	2880	F	R1	0,13	0,1	0,2	0,11	0,32	0,04	0,12	0,06	0,54	0,06
35	30	42	72	40	2880	F	R2	0,14	0,1	0,2	0,11	0,31	0,04	0,12	0,06	0,54	0,07
36	30	42	72	40	2880	F	R3	0,13	0,1	0,18	0,1	0,32	0,04	0,13	0,05	0,54	0,06

Tableau 5.2 Comparaison de scénarios en traitant le même volume des matières résiduelles

Sc.	Cam. Int.	Cam. Ext.	Nb. de cont.	Cap. de cont.	Vol. des matières traitées	Niv. D'ach.	Règle de rép.	Variables dépendantes (Résultats)							
								Coût ($)		Consom. (l)		Émis.(tCO2éq.)		Makespan (h)	
								Moyen	É-T	Moyen	É-T	Moyen	É-T	Moyen	É-T
1	60	84	144	20	2880	M	R1	21061,2	693,1	1630,35	34,47	4,903	0,1	11,78	0,32
2	60	84	144	20	2880	M	R2	21037,3	557,64	1670,78	33,49	5,024	0,1	11,58	0,31
3	60	84	144	20	2880	M	R3	22223,9	815,25	1693,98	28,97	5,094	0,09	12,39	0,42
4	60	84	144	20	2880	F	R1	22342	863,76	2307,68	70,08	6,94	0,21	12,96	0,57
5	60	84	144	20	2880	F	R2	22667,3	875,21	2398,26	81,7	7,212	0,25	12,79	0,42
6	60	84	144	20	2880	F	R3	23763,6	954,5	2378,83	77,59	7,154	0,23	13,46	0,48
7	30	42	72	40	2880	M	R1	15978,1	545,97	1387,85	32,21	4,173	0,1	8,61	0,32
8	30	42	72	40	2880	M	R2	15788,9	557,34	1415,37	45,35	4,256	0,14	8,37	0,25
9	30	42	72	40	2880	M	R3	16865,7	527,27	1443,52	28,95	4,341	0,09	9,32	0,33
10	30	42	72	40	2880	F	R1	15030,5	805,11	1856,69	105,4	5,583	0,32	9,3	0,45
11	30	42	72	40	2880	F	R2	14255,7	1042,41	1731,67	143,76	5,207	0,43	9,05	0,38
12	30	42	72	40	2880	F	R3	15650,5	602,2	1968,79	69,13	5,92	0,21	10,11	0,41
13	60	84	144	20	2880	M	R1	17315,3	242,27	1573,47	20,37	4,732	0,06	12,55	0,31
14	60	84	144	20	2880	M	R2	17417,3	312,56	1599,8	16,08	4,811	0,05	12,48	0,34
15	60	84	144	20	2880	M	R3	17542,6	327,97	1615,51	16,24	4,858	0,05	12,5	0,32
16	60	84	144	20	2880	F	R1	16591,4	306,28	1868,4	43,5	5,619	0,13	12,94	0,41
17	60	84	144	20	2880	F	R2	16796,5	212,17	1900,28	32,09	5,714	0,1	12,9	0,35
18	60	84	144	20	2880	F	R3	16860	359,72	1907,56	41,35	5,736	0,12	12,91	0,47
19	30	42	72	40	2880	M	R1	7544,04	803,02	897,726	78,43	2,7	0,24	7,8	0,21
20	30	42	72	40	2880	M	R2	7760,97	696,3	928,664	65,73	2,793	0,2	7,76	0,24
21	30	42	72	40	2880	M	R3	7787,37	608,16	935,863	57,96	2,814	0,17	7,78	0,21
22	30	42	72	40	2880	F	R1	7265,63	249,86	1052,57	38,78	3,165	0,12	8,81	0,43
23	30	42	72	40	2880	F	R2	7458,71	190,48	1082,3	31,94	3,255	0,1	8,76	0,42
24	30	42	72	40	2880	F	R3	7566,21	308,51	1096,02	38,35	3,296	0,12	8,76	0,49
25	60	84	144	20	2880	M	R1	15329,7	345,15	1370,56	21,96	4,121	0,07	12,47	0,29
26	60	84	144	20	2880	M	R2	15612,9	319,3	1402,95	16,45	4,219	0,05	12,51	0,31
27	60	84	144	20	2880	M	R3	15723,2	295,66	1418,14	16	4,265	0,05	12,5	0,29
28	60	84	144	20	2880	F	R1	14381,4	33,47	1626,55	0,44	4,891	170,12	12,99	0,1
29	60	84	144	20	2880	F	R2	14556,8	201,07	1654,82	32,14	4,976	0,1	12,95	0,36
30	60	84	144	20	2880	F	R3	14702,1	152,36	1671,3	28,93	5,026	0,09	13,02	0,4
31	30	42	72	40	2880	M	R1	7779,25	531,21	917,178	48,71	2,758	0,15	7,76	0,2
32	30	42	72	40	2880	M	R2	7983,93	531,21	946,189	48,71	2,845	0,15	7,78	0,2
33	30	42	72	40	2880	M	R3	8123,17	586,04	964,197	53,63	2,899	0,16	7,81	0,21
34	30	42	72	40	2880	F	R1	7263,26	581,6	1051,53	51,46	3,162	0,15	8,83	0,23
35	30	42	72	40	2880	F	R2	7444,65	218,41	1080,43	35,64	3,249	0,11	8,77	0,44
36	30	42	72	40	2880	F	R3	7582,33	149,26	1096,03	32,6	3,296	0,1	8,87	0,41

Puisque dans l'approche proposée il ne reste que les camions externes dans les files et que les camions internes et CTR se dirigent directement à la zone d'échange, le temps moyen d'attente réduit significativement et il ne dépend que du niveau d'achalandage des camions externes. De plus, la sensibilité du temps d'attente au niveau d'achalandage dans le système proposé est moins de celle de système actuel. Comme le montre la figure 5.2, la différence de temps moyen d'attente entre le niveau d'achalandage moyen et fort au système actuel est presque une heure alors que dans le système proposé, c'est à peu près 0,1 heure. En outre, la sensibilité de système proposé au niveau du temps d'attente aux règles de répartition est moins de celle de système actuel. La figure 5.2 représente la comparaison entre le système actuel et celui proposé (la capacité des CTR est deux conteneurs) dans la file d'attente à l'entrée de l'usine de tri et de traitement. Afin d'éviter toute confusion, dans les figures 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 et 5.6, les résultats de la simulation des scénarios 1 au 24 sont seulement présentés.

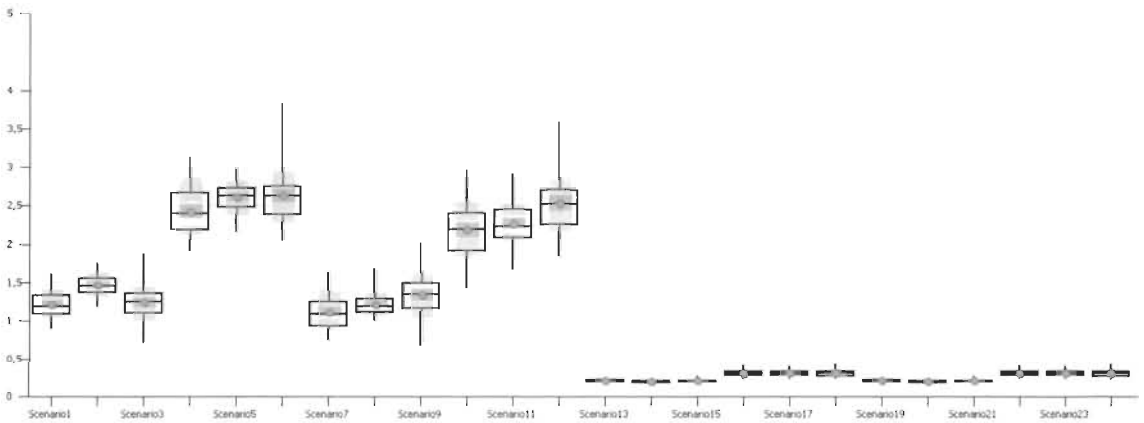


Figure 5.2 Temps moyen d'attente dans la file de l'UTT

En ce qui concerne le temps moyen de passage aux sites de l'entreprise, dans l'approche proposée pour les camions internes cela varie dans divers scénarios entre 0,02 et 0,06 heure (1,2 et 3,6 minutes) qui s'avère seulement la somme des temps de positionnement et/ou cueillette des conteneurs de camions « *Hook-lift* ». Par rapport aux camions externes, comme le montre la figure 5.3, les résultats de la simulation démontrent une baisse significative dans l'approche proposée. Dans l'ensemble des types de systèmes

logistiques, le temps de passage pour l'achalandage fort est plus élevé que celui de l'achalandage moyen et cette différence est quasiment la même dans tous les cas. Pourtant, dans le système logistique proposé, cette différence est moindre que celle observée dans le système logistique actuel. Le temps moyen de passage aux sites de l'entreprise pour les conteneurs de 20 verges cubes est à peu près égal de celui des conteneurs de 40 verges cubes. En outre, au niveau de la règle de répartition, les résultats démontrent que dans le système logistique actuel, pour le cas où la règle de répartition des tâches est en fonction de la distance la plus courte, le temps moyen de passage est moindre que celui des autres règles. Pour le système logistique alternatif, les résultats de l'ensemble des règles de répartition sont quasiment les mêmes. Autrement dit, le système logistique alternatif est moins sensible à la règle de répartition.

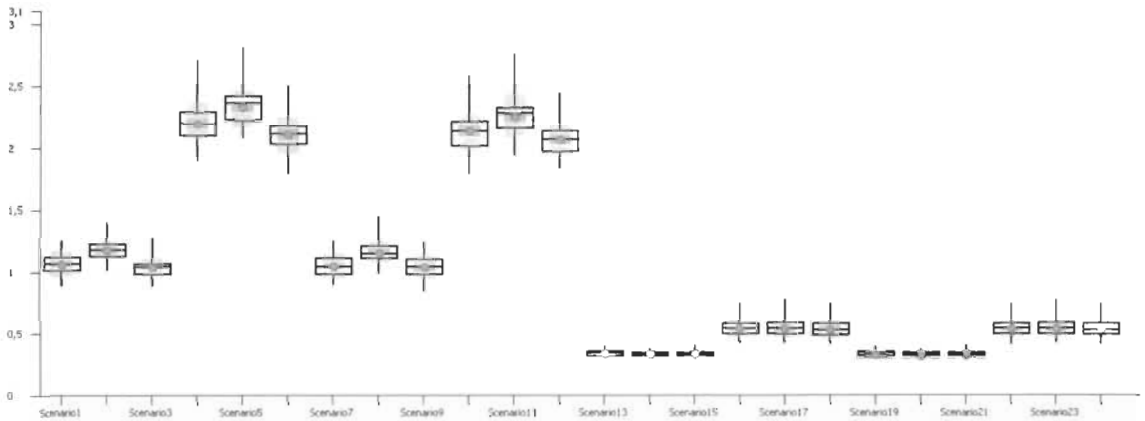


Figure 5.3 Temps moyen de passage des camions externes

L'évaluation des résultats au niveau de coût total de transport et manutention démontre qu'en recourant qu'à des conteneurs de 40 verges cubes dans n'importe quel système logistique, le coût sera moindre. De plus, les résultats dévoilent le fait que le système logistique alternatif n'est pas toujours la meilleure option. Par contre, en comparaison avec le système logistique actuel utilisant seulement des conteneurs de 40 verges cubes et le système logistique alternatif utilisant seulement avec les conteneurs de 20 verges cubes, c'est l'approche actuelle qui est moins coûteuse. Autrement dit, l'approche alternative est seulement convenable pour les conteneurs dont la capacité est de 40 verges cubes. De

plus, les résultats de la simulation démontrent que l'approche alternative est moins sensible aux règles de la répartition des camions internes et le niveau d'achalandage des camions externes. La figure 5.4 représente la comparaison du coût total en transportant et traitant le même volume en matières CRD pour les 24 premiers scénarios.

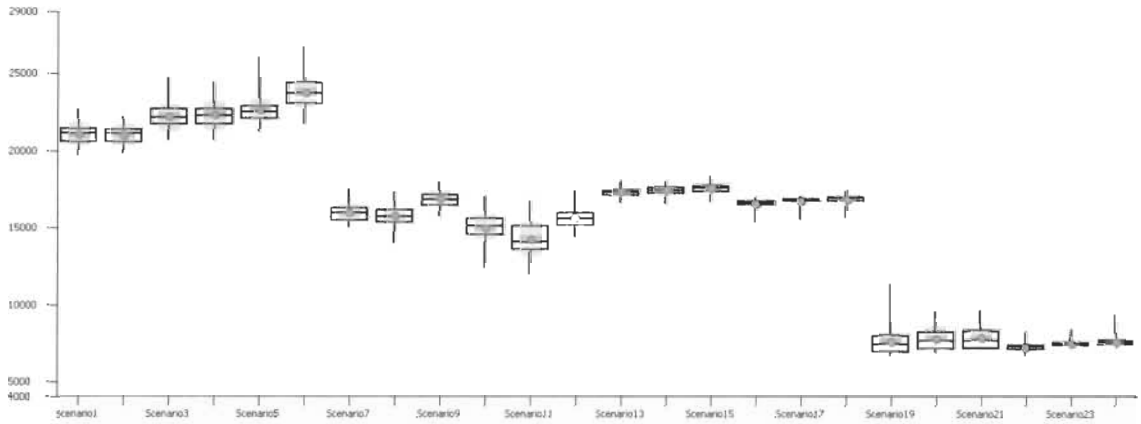


Figure 5.4 Comparaison du coût total des 24 premiers scénarios

En ce qui concerne la consommation de carburant et puis les émissions de GES, la valeur des ces derniers est toujours plus élevée au cas où le niveau d'achalandage est fort. Pourtant, l'avantage de système logistique proposé est qu'en intensifiant le niveau d'achalandage, la consommation et l'émission augmentent avec une pente moins abrupte. Comme le montre la figure 5.5, la différence entre les résultats des deux niveaux d'achalandage dans le système logistique proposé est moindre que celui de système actuel.

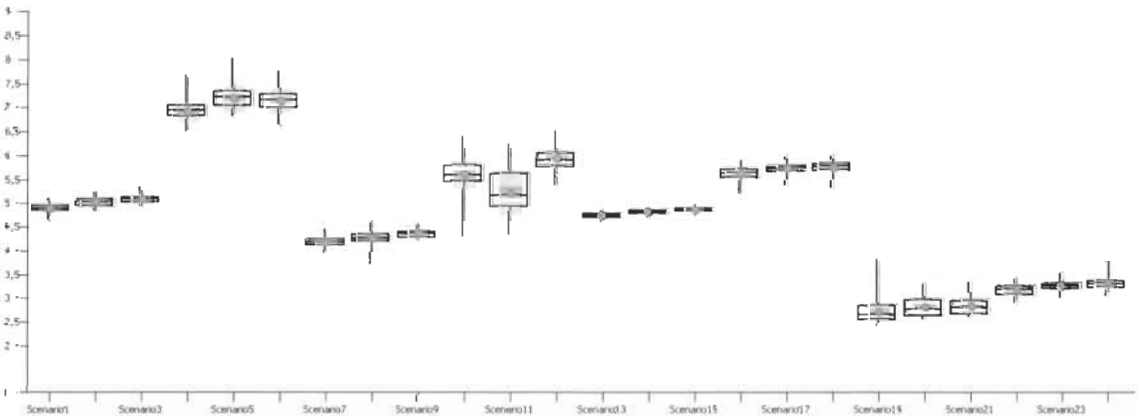


Figure 5.5 Comparaison des émissions totales des 24 premiers scénarios

Au niveau du makespan, c'est l'approche proposée avec les conteneurs de 40 verges cubes et le niveau d'achalandage moyen auquel le transport et traitement des matières résiduelles se font dans le meilleur délai. En se servant les conteneurs de 40 verges cubes dans le système logistique actuel et les conteneurs de 20 verges cubes dans le système logistique proposé, la supériorité est toujours au système actuel. La figure 5,6 représente la comparaison du délai de transport et traitement de même volume des matières CRD pour les 24 premiers scénarios.

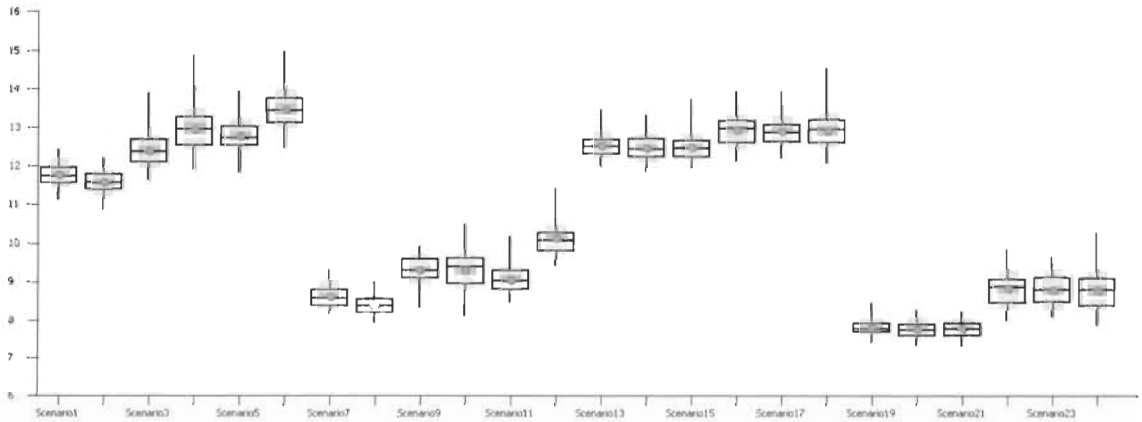


Figure 5.6 Comparaison du makespan des 24 premiers scénarios

Dans l'éventualité où nous comparons les deux systèmes logistiques en traitant le même volume des matières CRD, il n'est pas possible d'évaluer efficacement la supériorité de l'approche proposée au niveau de plusieurs paramètres, car la performance de ces systèmes logistiques en fonction de la charge de travail n'est pas linéaire. C'est la raison pour laquelle dans la deuxième catégorie de tests numériques, les systèmes logistiques transportent et traitent toutes les matières CRD disponibles et, avant la visualisation des résultats, on divise les valeurs des paramètres extrants par le volume des matières traités pour avoir la valeur des indicateurs de performance en traitant d'une verge cube des matières résiduelles. Le tableau 5.3 représente les résultats de la simulation dont le critère d'arrêt est le transport et traitement de toutes les matières disponibles et le tableau 5.4 représente le résultat de division des valeurs extrants par le volume des matières transportées et traitées.

Tableau 5.3 Comparaison de scénarios en traitant tous les conteneurs

Sc.	Cam. Int.	Cam. Ext.	Nb. de cont.	Cap. de cont.	Vol. des matières traitées	Niv. D'ach.	Règle de rép.	Variables dépendantes (Résultats)							
								Coût ($)		Consom. (l)		Émis.(tCO2éq.)		Makespan (h)	
								Moyen	É-T	Moyen	É-T	Moyen	É-T	Moyen	É-T
1	60	84	144	20	2880	Moyen	R1	21061,2	693,1	1630,35	34,47	4,903	0,1	11,78	0,32
2	60	84	144	20	2880	Moyen	R2	21037,3	557,64	1670,78	33,49	5,024	0,1	11,58	0,31
3	60	84	144	20	2880	Moyen	R3	22223,9	815,25	1693,98	28,97	5,094	0,09	12,39	0,42
4	60	132	192	20	3840	Fort	R1	34445,6	1066,07	2487,34	72,08	7,48	0,22	15,13	0,58
5	60	132	192	20	3840	Fort	R2	34668,9	895,05	2575,7	79,75	7,746	0,24	14,96	0,43
6	60	132	192	20	3840	Fort	R3	36297,8	1169,41	2564,19	78,34	7,711	0,24	15,64	0,5
7	60	84	144	40	5760	Moyen	R1	30868,9	1023	1841,97	35,73	5,539	0,11	13,96	0,34
8	60	84	144	40	5760	Moyen	R2	31098,8	983,72	1890,65	40,33	5,685	0,12	13,81	0,29
9	60	84	144	40	5760	Moyen	R3	32893,8	1135,57	1909,12	32,19	5,741	0,1	14,56	0,44
10	60	132	192	40	7680	Fort	R1	45843,5	2087,32	2767,83	77,82	8,323	0,23	18,09	0,54
11	60	132	192	40	7680	Fort	R2	46356,5	1793,81	2859,65	92,23	8,599	0,28	17,95	0,46
12	60	132	192	40	7680	Fort	R3	49025,6	2057,82	2844,09	70,9	8,553	0,21	18,67	0,57
13	60	84	144	20	2880	Moyen	R1	17315,3	242,27	1573,47	20,37	4,732	0,06	12,55	0,31
14	60	84	144	20	2880	Moyen	R2	17417,3	312,56	1599,8	16,08	4,811	0,05	12,48	0,34
15	60	84	144	20	2880	Moyen	R3	17542,6	327,97	1615,51	16,24	4,858	0,05	12,5	0,32
16	60	132	192	20	3840	Fort	R1	24759,9	228,1	1996,17	46,57	6,003	0,14	15,68	0,41
17	60	132	192	20	3840	Fort	R2	24941,7	162,74	2023,97	40,74	6,086	0,12	15,66	0,36
18	60	132	192	20	3840	Fort	R3	25065,4	217,42	2037,2	40,54	6,126	0,12	15,67	0,49
19	60	84	144	40	5760	Moyen	R1	21619,6	153,98	1583,93	20,25	4,763	0,06	12,55	0,31
20	60	84	144	40	5760	Moyen	R2	21783,1	154,61	1610,67	15,18	4,844	0,05	12,48	0,34
21	60	84	144	40	5760	Moyen	R3	21913,3	146	1626,73	15,23	4,892	0,05	12,5	0,32
22	60	132	192	40	7680	Fort	R1	24759,9	228,1	1996,17	46,57	6,003	0,14	15,68	0,41
23	60	132	192	40	7680	Fort	R2	24941,7	162,74	2023,97	40,74	6,086	0,12	15,66	0,36
24	60	132	192	40	7680	Fort	R3	25065,4	217,42	2037,2	40,54	6,126	0,12	15,67	0,49
25	60	84	144	20	2880	Moyen	R1	15329,7	345,15	1370,56	21,96	4,121	0,07	12,47	0,29
26	60	84	144	20	2880	Moyen	R2	15612,9	319,3	1402,95	16,45	4,219	0,05	12,51	0,31
27	60	84	144	20	2880	Moyen	R3	15723,2	295,66	1418,14	16	4,265	0,05	12,5	0,29
28	60	132	192	20	3840	Fort	R1	22522,8	205,93	1751,65	46,07	5,267	0,14	15,74	0,44
29	60	132	192	20	3840	Fort	R2	22706,2	181,95	1780,13	42,93	5,353	0,13	15,68	0,39
30	60	132	192	20	3840	Fort	R3	22838,4	191,86	1795,52	43,04	5,399	0,13	15,77	0,4
31	60	84	144	40	5760	Moyen	R1	19751,1	157,17	1382,47	21,29	4,157	0,06	12,47	0,29
32	60	84	144	40	5760	Moyen	R2	19980,6	155,38	1414,19	15,33	4,253	0,05	12,51	0,31
33	60	84	144	40	5760	Moyen	R3	20082,9	143,8	1429,15	15,58	4,298	0,05	12,5	0,29
34	60	132	192	40	7680	Fort	R1	22522,8	205,93	1751,65	46,07	5,267	0,14	15,74	0,44
35	60	132	192	40	7680	Fort	R2	22706,2	181,95	1780,13	42,93	5,353	0,13	15,68	0,39
36	60	132	192	40	7680	Fort	R3	22838,4	191,86	1795,52	43,04	5,399	0,13	15,77	0,4

Tableau 5.4 Comparaison de scénarios par verge cube des matières traitées

Sc.	Cam. Int.	Cam. Ext.	Nb. de cont.	Cap. de cont.	Vol. des matières traitées	Niv. D'ach.	Règle de rép.	Résultats		
								Coût ($/V³)	Consommation (l/V³)	Émission (tCO2éq./V³)
1	60	84	144	20	2880	Moyen	R1	7,31	0,57	0,002
2	60	84	144	20	2880	Moyen	R2	7,3	0,58	0,002
3	60	84	144	20	2880	Moyen	R3	7,72	0,59	0,002
4	60	132	192	20	3840	Fort	R1	8,97	0,65	0,002
5	60	132	192	20	3840	Fort	R2	9,03	0,67	0,002
6	60	132	192	20	3840	Fort	R3	9,45	0,67	0,002
7	60	84	144	40	5760	Moyen	R1	5,36	0,32	0,001
8	60	84	144	40	5760	Moyen	R2	5,4	0,33	0,001
9	60	84	144	40	5760	Moyen	R3	5,71	0,33	0,001
10	60	132	192	40	7680	Fort	R1	5,97	0,36	0,001
11	60	132	192	40	7680	Fort	R2	6,04	0,37	0,001
12	60	132	192	40	7680	Fort	R3	6,38	0,37	0,001
13	60	84	144	20	2880	Moyen	R1	6,01	0,55	0,002
14	60	84	144	20	2880	Moyen	R2	6,05	0,56	0,002
15	60	84	144	20	2880	Moyen	R3	6,09	0,56	0,002
16	60	132	192	20	3840	Fort	R1	6,45	0,52	0,002
17	60	132	192	20	3840	Fort	R2	6,5	0,53	0,002
18	60	132	192	20	3840	Fort	R3	6,53	0,53	0,002
19	60	84	144	40	5760	Moyen	R1	3,75	0,27	0,001
20	60	84	144	40	5760	Moyen	R2	3,78	0,28	0,001
21	60	84	144	40	5760	Moyen	R3	3,8	0,28	0,001
22	60	132	192	40	7680	Fort	R1	3,22	0,26	0,001
23	60	132	192	40	7680	Fort	R2	3,25	0,26	0,001
24	60	132	192	40	7680	Fort	R3	3,26	0,27	0,001
25	60	84	144	20	2880	Moyen	R1	5,32	0,48	0,001
26	60	84	144	20	2880	Moyen	R2	5,42	0,49	0,001
27	60	84	144	20	2880	Moyen	R3	5,46	0,49	0,001
28	60	132	192	20	3840	Fort	R1	5,87	0,46	0,001
29	60	132	192	20	3840	Fort	R2	5,91	0,46	0,001
30	60	132	192	20	3840	Fort	R3	5,95	0,47	0,001
31	60	84	144	40	5760	Moyen	R1	3,43	0,24	0,001
32	60	84	144	40	5760	Moyen	R2	3,47	0,25	0,001
33	60	84	144	40	5760	Moyen	R3	3,49	0,25	0,001
34	60	132	192	40	7680	Fort	R1	2,93	0,23	0,001
35	60	132	192	40	7680	Fort	R2	2,96	0,23	0,001
36	60	132	192	40	7680	Fort	R3	2,97	0,23	0,001

Selon les données des tableaux 5.3 et 5.4 ainsi qu'une synthèse des résultats sous forme de figures 5.7 et 5.8, les pires scénarios au niveau du coût et de la consommation de carburant sont les scénarios dans lesquels l'entreprise implante le système logistique actuel en se servant des conteneurs 20 verges cubes avec un niveau d'achalandage fort. Par contre, les meilleurs scénarios sont ceux dans lesquels l'entreprise bénéfice du système logistique proposé avec des CTR dont la capacité est de 3 conteneurs de 40 verges cubes avec un niveau d'achalandage fort. La différence entre le pire et le meilleur scénario est de 6,48 $\$/v^3$ et 0,44 l/v^3. En traitant le volume minimum (2880 v^3) des matières CRD dans la journée, il y a une réduction de coût de 8662,4 $ et la réduction de la consommation de carburant soit 1267,2 litres.

En augmentant les volumes de matières à transporter et traiter par le système logistique proposé, le coût et la consommation de carburant par verge cube de matières transportées baisse. Ceci s'explique par la capacité qui est dégagée en bénéficiant de la nouvelle approche logistique. De cette façon, l'entreprise peut signer des nouveaux contrats et offrir son service à davantage de clients.

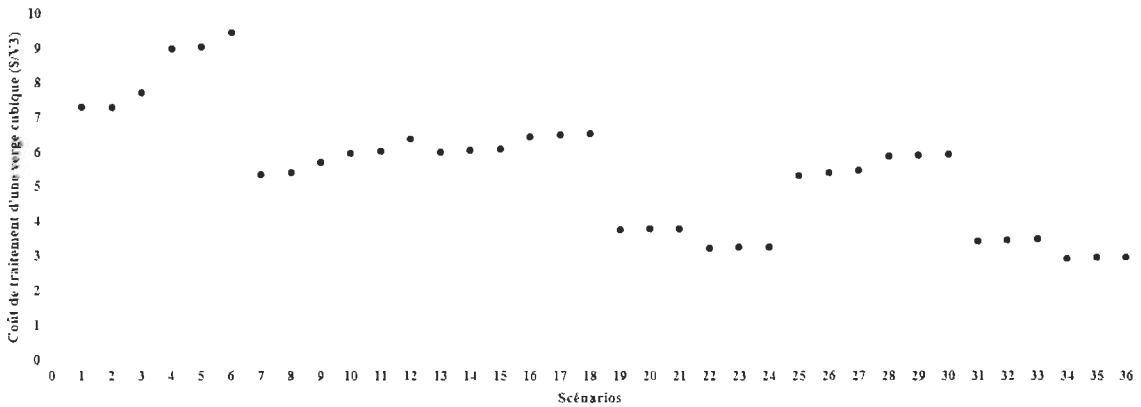


Figure 5.7 Comparaison de coût total par verge cube des matières

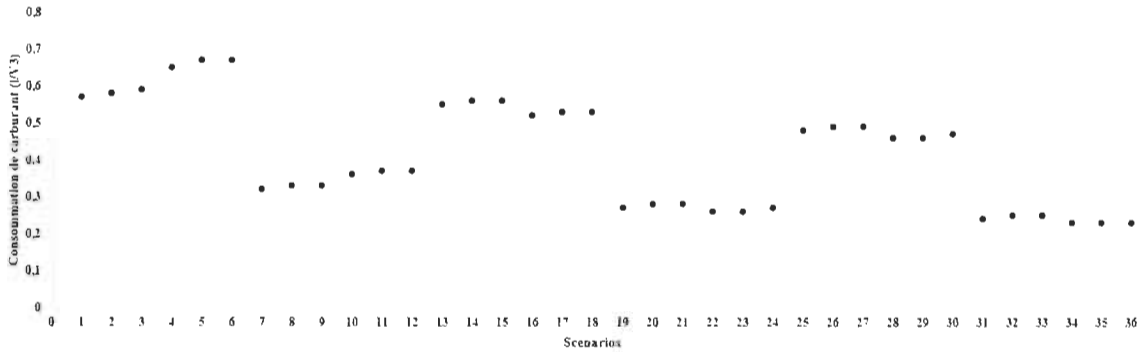


Figure 5.8 Comparaison de la consommation de carburant par verge cube des matières

5.2 Nombre optimal des camions de service et CTR

Dans l'approche alternative, le transport de conteneurs depuis la zone d'échange de l'usine de tri et de traitement à la zone de déchargement est identifié comme le goulot de la chaîne logistique. Donc, il devient très important d'attribuer suffisamment de camions de service à ce secteur de la chaîne pour accomplir le transport de conteneur dans un délai satisfaisant. Afin de connaître le nombre suffisant des camions de service dans une journée de travail, une analyse a été effectuée. Comme le montre la figure 5.9, en recourant à un seul camion de service, le transport des conteneurs n'est pas réalisé complètement pendant un cycle de 24 heures (une journée). Par contre, en se servant de 3 camions de service en même temps, le transport de tous les conteneurs peut se fait avant minuit la même journée. De la même manière, afin de transporter l'ensemble des conteneurs avant 19h, il faut se servir de 6 camions de service.

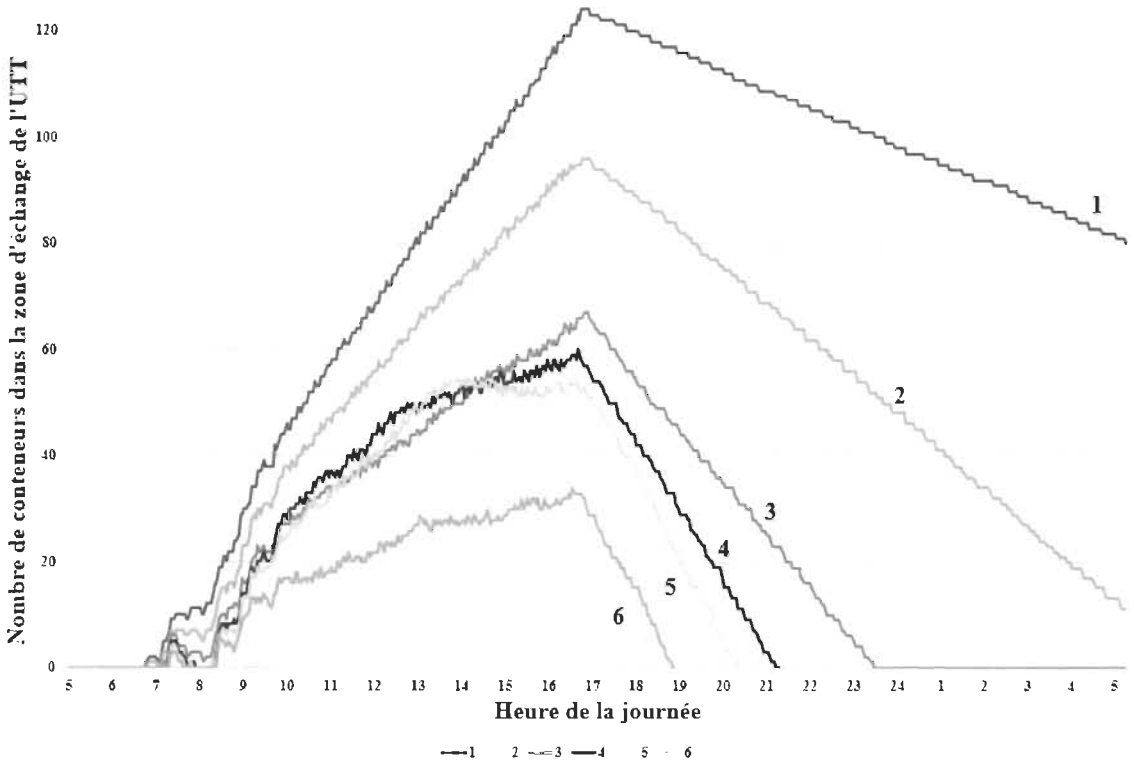


Figure 5.9 Nombre de conteneurs dans la zone d'échange de l'usine de tri et de traitement pendant la journée

Une analyse a été conduite afin de déterminer le nombre optimal des CTR avec une capacité de 3 conteneurs, pour effectuer le transport des conteneurs depuis la zone d'échange de CT1 et CT2 vers la zone d'échange de l'usine de tri et de traitement. Il faut noter qu'il est nécessaire de transporter les conteneurs de sorte que les camions de service aient suffisant de temps pour effectuer leurs tâches. Pour ce faire, il est souhaitable que les conteneurs des CT1 et CT2 arrivent à la zone d'échange de l'usine de tri et de traitement avant 15h. La figure 5.10 représente la somme des conteneurs dans les zones d'échange de CT1 et CT2 chaque heure de la journée. Au début de la journée, il existe à peu près 40 conteneurs dans chacune des zones d'échange (80 conteneurs au total) et il faut conserver le même nombre à la fin de la journée. Comme la figure 5.10 le montre, en recourant à un seul CTR, le transport de tous les conteneurs n'est pas terminé dans un

même cycle de 24 heures (une journée) et il reste à la fin de journée à peu près 50 conteneurs de plus dans les zones d'échanges de CT1 et CT2. Par contre, en se servant de 4 CTR, le transport de tous les conteneurs peut se fait avant 21h et, de la même manière, afin de transporter l'ensemble des conteneurs avant 15h, il faudrait se servir de 7 CTR.

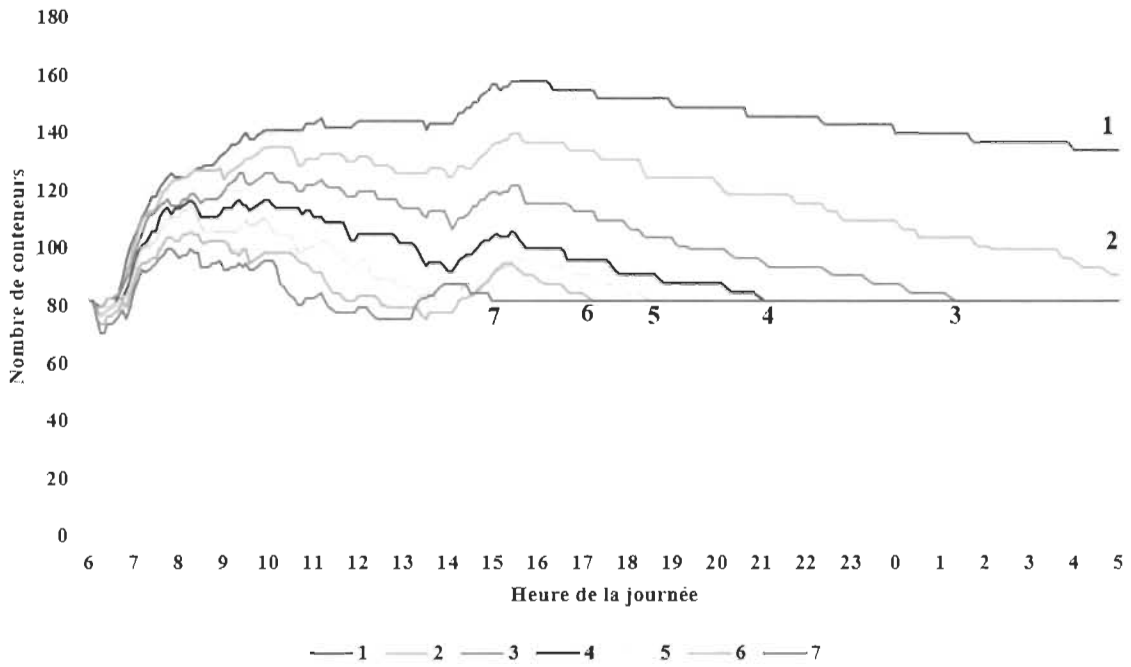


Figure 5.10 Nombre de conteneurs dans les zones d'échange de CT1 et CT2 pendant la journée selon le nombre de CTR

5.3 Scénarios de transition vers l'approche alternative

Étant donné qu'une période de transition de plusieurs années doit être envisagée pour le changement de l'approche actuelle vers l'approche alternative, une évaluation de la réduction du temps d'attente et des coûts associés est réalisée en définissant quatre scénarios supplémentaires, soit les scénarios de transition, dans lesquels différents niveaux d'implantation de l'approche alternative sont mis en œuvre. Ces scénarios représentent respectivement la mise en œuvre de 20, 40, 60 et 80 % du nombre de camions de type « *Hook-lift* » et trains routiers au lieu des camions « *Roll-off* » et CRPM.

Les résultats de la simulation des scénarios de transition montrent que la tendance de réduction du temps d'attente aux divers sites de l'entreprise n'est pas identique. Comme présenté au tableau 5.5 et la figure 5.11, pour les centres de transbordement, le temps moyen d'attente des camions aux files réduit significativement dès le premier scénario et pour tous les scénarios de transition suivants, en suivant des courbes concaves. Pour l'usine de tri et de traitement, une réduction importante du temps d'attente survient dans les derniers scénarios et la courbe a plutôt une forme convexe. L'explication réside dans le fait que dans les premiers scénarios de transition, le nombre de CRPM dans la file de l'usine de tri et de traitement est encore considérable.

Tableau 5.5 Temps moyen d'attente aux divers scénarios de transition

	File de CT1 (h)	File de CT2 (h)	File de UTT(h)
Scénario de référence	0,65	0,93	1,11
Scénario de transition 1 (20%)	0,48	0,64	1
Réduction	25,51%	31,58%	10,29%
Scénario de transition 2 (40%)	0,35	0,45	0,88
Réduction	46,22%	51,98%	20,56
Scénario de transition 3 (60%)	0,2	0,3	0,77
Réduction	69,01%	67,52%	30,41%
Scénario de transition 4 (80%)	0,09	0,16	0,57
Réduction	85,39%	83,11%	48,73%
Scénario alternatif	0,02	0,08	0,21
Réduction	96,92%	91,40%	81,08%

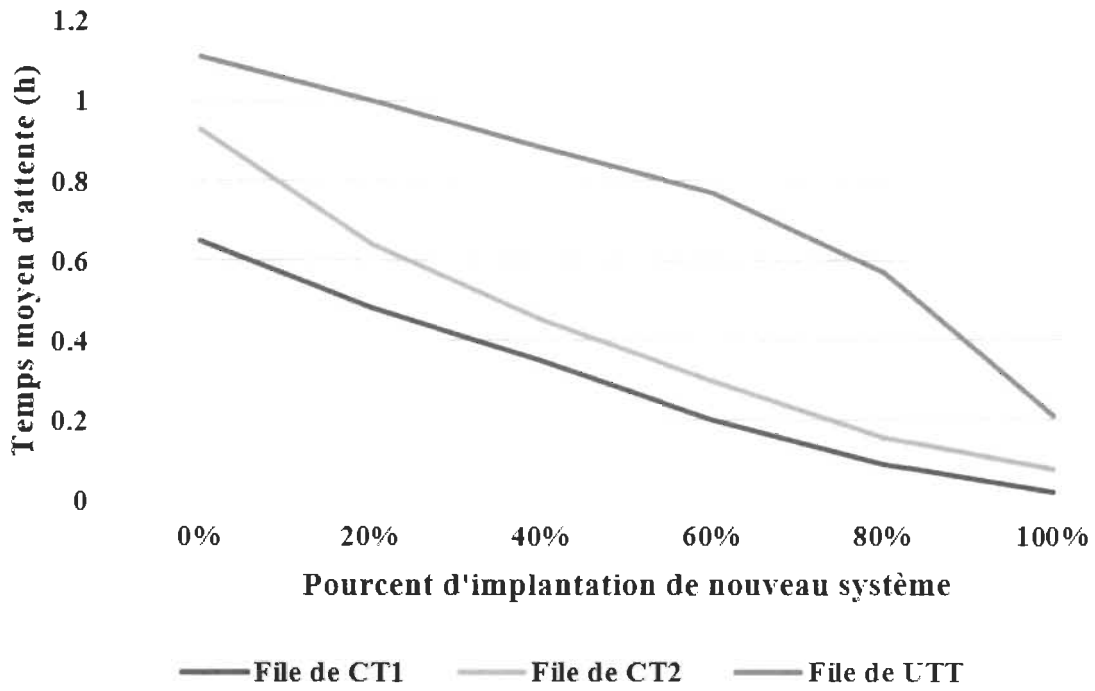


Figure 5.11 Temps moyen d'attente aux scénarios de transition

Les résultats de la simulation du premier scénario de transition démontrent que la mise en place de seulement 20% de la nouvelle approche a réduit significativement le temps moyen de passage des divers types de camions dans les files. Les résultats du deuxième scénario de transition démontrent que la courbe du temps de passage des camions internes n'est pas linéaire et, en mettant en œuvre de 40% de la nouvelle approche, le temps moyen de passage des camions internes a réduit jusqu'à 54%. De cette manière, c'est dans le troisième scénario de transition que le temps moyen de passage des camions internes atteint 64%. Ce paramètre est réduit de 84% dans le scénario de transition 4. Au total, cette nouvelle approche est plus efficace, même si elle n'est pas implantée entièrement. Le tableau 5.6 représente les résultats de la simulation des scénarios de transition en termes de temps moyen de passage des camions.

Tableau 5.6 Temps moyen de passage aux scénarios de transition

Scénarios	Camions internes	Camions externes	CRPM
Scénario actuel	1,36	1,76	0,67
Scénario de transition 1 (20%)	0,87	1,49	0,64
Réduction	36,21%	15,09%	5,21%
Scénario de transition 2 (40%)	0,62	1,39	0,61
Réduction	54,26%	21,18%	9,28%
Scénario de transition 3 (60%)	0,49	1,22	0,57
Réduction	64,26%	30,72%	14,41%
Scénario de transition 4 (80%)	0,21	1,02	0,42
Réduction	84,27%	42,01%	37,06%
Scénario alternatif	0,12	0,34	-
Réduction	91,18%	80,68%	-

Malgré que la réduction du temps moyen d'attente des différents camions en fonction du pourcentage d'implantation de la nouvelle approche ne soit pas linéaire, la courbe du coût total et des émissions de GES sont plutôt linéaires. Comme le tableau 5.7 le représente, en utilisant la nouvelle approche logistique, le coût total de transport et de manutention est réduit jusqu'à 36,02% et les émissions de GES atteignent 24,95% de réduction.

Tableau 5.7 Coût total et émissions de GES pour les scénarios de transition

Scénarios	**Coût total ($CA)**	**Réduction**	**Émission (tCO_2éq)**	**Réduction**
Scénario actuel	30868,9	-	5,539	-
Scénario de transition 1 (20%)	28643,3	7,21%	5,269	4,87%
Scénario de transition 2 (40%)	26250,9	14,96%	5,098	7,96%
Scénario de transition 3 (60%)	23883,3	22,63%	4,851	12,43%
Scénario de transition 4 (80%)	21685,4	29,75%	4,586	17,21%
Scénario alternatif	19749,9	36,02%	4,157	24,95%

Puisque la flotte des camions internes de l'entreprise a une durée de vie utile d'environ 10 ans et que l'entreprise renouvelle chaque année à peu près 10% de sa flotte, les résultats de la simulation montrent que si l'entreprise remplace 10% de son ancienne flotte par celle proposée chaque année, à la fin de la quatrième année, il y aura une réduction de 14,96%

des coûts. De plus, étant donné que les camions équipés du système de levage à crochet (*Hook-lift*) ont pratiquement le même prix que les camions utilisant le système de levage à treuil hydraulique (*Roll-off*), le remplacement de l'ancienne flotte par la nouvelle dans une période de transition de 10 ans n'implique pas des coûts supplémentaires significatifs. Cependant, un point de fixation universel du conteneur est nécessaire pour activer les deux systèmes de levage. Cela entraînera nécessairement des coûts supplémentaires pendant la période de transition, par exemple lors de l'achat d'un nouveau conteneur une fois que ce dernier ait atteint la fin de sa durée de vie normale ou, pour les conteneurs plus récents, d'inclure dans leur plan de maintenance une tâche de modification de leur point de fixation. La figure 5.12 représente la réduction du temps moyen d'attente et les coûts de transport et manutention au cours de 10 années de transition.

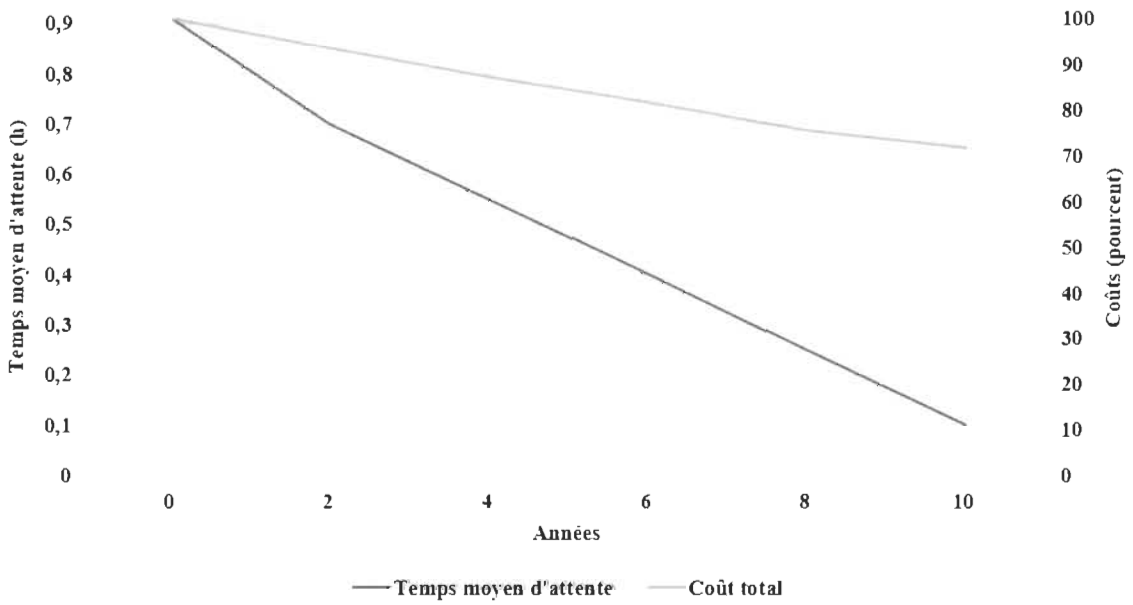


Figure 5.12 Réduction du temps d'attente et du coût total au cours de 10 années

CHAPITRE 6 CONCLUSION

6.1 Synthèse de la recherche

Cette recherche avait pour but d'évaluer l'impact de plusieurs variables sur le temps d'attente des camions aux entrées des sites dans l'industrie de la valorisation des matières CRD. Puis, l'impact de la réduction de temps d'attente sur d'autres facteurs a été évalué. Une revue de littérature a alors permis de présenter le secteur de l'industrie de la valorisation des matières CRD et comparer la problématique des files d'attente dans diverses industries. Ensuite, un résumé des solutions proposées par des travaux de recherches précédentes et leurs impacts sur divers indicateurs de performance est présenté. Dans ce mémoire, la conteneurisation intégrale a été proposée comme une nouvelle approche logistique dans l'industrie de la valorisation des matériaux CRD et a été comparée à l'approche de transport conventionnelle dans cette industrie. Ceci a été fait en réalisant une étude de cas au sein d'une entreprise de recyclage des matières CRD. Le réseau logistique comprend cent-cinquante clients, un centre de répartition, deux centres de transbordement et une usine de tri et de traitement. Les conteneurs sont transportés par cinq différents types de camions. Les variables indépendantes identifiées sont la capacité des conteneurs, la règle de répartition des camions internes, le niveau d'achalandage des camions externes et le type de système logistique appliqué. Sur la base des informations collectées au cours de rencontres avec les responsables de l'entreprise partenaire et les données collectées sur le terrain pendant une journée de travail, un modèle des trajectoires et des processus a été conçu. Ensuite, le modèle conçu a été implanté sur le logiciel Simio. Ce modèle de simulation a ses propres complexités. Premièrement, puisque l'on a l'intention d'évaluer les scénarios de transition et donc se servir de deux systèmes logistiques en même temps, nous avons opter pour que les deux systèmes logistiques soient dans un seul modèle. Deuxièmement, les matières et conteneurs sont transportés par cinq différents types de camions qui ont des trajectoires en propres ou similaires. De plus, le modèle de réseau consiste en plus de cinq cents objets à travers la région métropolitaine de Montréal et ses alentours. Puis, afin de modéliser la variation des

localisations de clients, un programme distinct a été écrit pour créer des listes de tâches durant cinquante journées de travail de sorte que la liste des tâches de la réplication numéro « r » de l'ensemble des scénarios soit la même.

Pour valider le modèle de simulation, un test T a été réalisé en comparant les valeurs observées et simulées de taux d'arrivée des camions internes et de temps moyen d'attente des camions dans les files de CT1, CT2 et l'UTT, ainsi pour le temps moyen de passage des camions internes, camions externes et les CRPM aux sites de l'entreprise. Dans tous les cas, la valeur-p est supérieure à 0,05, ce qui confirme que le modèle de simulation n'est pas statistiquement différent du système réel. Ensuite, les variables dépendantes y compris le temps d'attente des camions dans les files d'attente, le temps de passage de divers types de camions aux sites de l'entreprise, les coûts de transport et de manutention, la consommation de carburant et les émissions de GES ont été évaluées précisément en simulant les scénarios de l'approche logistique actuelle et celle proposée afin d'analyser l'impact de la variation des variables indépendantes sur la réduction des indicateurs de performance. Les résultats de la simulation montrent, en général, des gains avec la nouvelle approche proposée. De plus, en simulant 36 scénarios avec diverses valeurs de paramètres en intrant, un portait complet des avantages, des inconvénients et de la sensibilité de la nouvelle approche alternative proposée a été faite. Enfin, en tenant compte de la durée de vie utile des camions, une stratégie de transition de l'approche actuelle vers l'approche alternative est proposée.

6.2 Limitations de la recherche

Il est important de préciser que l'ensemble des résultats présentés dans ce mémoire sont basés sur les données collectées lors d'une seule journée d'observation, car la collecte de données manuelle était longue et difficile. Étant donné que le nombre de commandes des clients et des matières transportées peut varier en fonction de la saison, du climat et des conditions du marché régional, des tests numériques supplémentaires seront nécessaires pour davantage supporter une prévision de bénéfices sur dix ans. De plus, en raison de la confidentialité des données des clients, la localisation des clients fut déterminée de

manière aléatoire à l'intérieur de chaque territoire. En outre, le modèle peut être amélioré en migrant des paramètres actuellement déterministes vers stochastiques, car ceci serait plus représentatif de la réalité.

6.3 Contributions de la recherche et retombées pratiques

Tout d'abord, la recension des écrits sur la réduction de file d'attente aux installations des chaînes logistiques de la valorisation des matières résiduelles a montré que très peu de travaux avaient été faits en ce sens. Les travaux réalisés dans ce mémoire ont permis de décrire et détailler avec précision ce type de chaîne logistique depuis le centre de répartition jusqu'à l'usine de tri et de traitement, ce qui contribue à la littérature scientifique au niveau théorique. La méthodologie proposée dans ce mémoire permet de trouver des solutions optimales parmi celles testées et des solutions robustes, ce qui permet de générer plusieurs options et d'offrir des choix aux gestionnaires de ce type de l'entreprise. Cette étude a permis de démontrer que, dans une telle entreprise, il est possible que la mise en place d'un nouveau système logistique comme celui présenté puisse déboucher sur une réduction des coûts, de la consommation de carburant et les émissions de GES, ce que l'on ne retrouve pas dans la littérature dans ce domaine. Dans une industrie en essor comme l'industrie de valorisation des matières résiduelles au Québec, il est intéressant de connaître les possibilités qui s'offrent aux entreprises ainsi que de tester d'autres possibilités via une approche de simulation avant son déploiement. Finalement, cette recherche contribue aux développements des connaissances sur les impacts de la conteneurisation intégrale.

6.4 Avenues futures en recherche

Dans cette étude, l'impact de la conteneurisation intégrale, ainsi que la capacité des conteneurs, le niveau d'achalandage des camions externes et les règles de répartition sur la réduction de file d'attente débouchant sur la réduction des coûts totaux, la consommation de carburant et les émissions de GES ont été vérifiés. Si l'entreprise de recyclage décidait de signer de nouveaux contrats et d'accepter des commandes supplémentaires, il faudrait alors mesurer l'impact d'une hausse du nombre de camions sur

le temps d'attente et la qualité de service. En effet, une hausse du nombre de camions conduirait à une file d'attente très longue et une situation critique. Sachant que la solution proposée par notre recherche pourrait être une solution, l'investigation plus précise sur ce sujet est recommandée. Il pourrait être intéressant de considérer séparément le transport et traitement des différents types des matières CRD (béton, ciment, bois, gypse, plâtre, agrégat), car ce qui détermine le type de conteneur est le poids et le volume des matières aux sites des clients. De plus, l'impact du pourcentage de remplissage de conteneurs est un autre facteur qui pourrait être investigué. En outre, une simulation dans laquelle, divers types de conteneurs sont utilisés est plus représentatif de réalité. De plus, il serait intéressant d'ajouter le transport des matières résiduelles de l'usine de tri et de traitement au site de l'enfouissement. Il serait aussi intéressant de développer une méthode de collecte de données systématique afin d'alimenter le modèle avec plus de données. En effet, une collecte manuelle de données requiert plusieurs ressources et de temps pour arriver à une taille d'échantillon adéquate qui affecte la validité du modèle. De plus, si ce modèle pouvait être alimenté avec des données en temps réel, cela permettrait de prendre des décisions de nature opérationnelle, par exemple par une nouvelle de règle de répartition. Enfin, une étude de cas dans une autre entreprise pourrait être effectuée afin de vérifier si les résultats peuvent être généralisés dans tous ces types d'entreprises de recyclage ou s'ils s'appliquent seulement à l'entreprise étudiée.

6.5 Conclusion finale

Ce mémoire de maîtrise constitue une contribution au développement des connaissances dans le domaine de la gestion de la chaîne logistique dans l'industrie de la valorisation des matières résiduelles particulièrement les matières CRD. La poursuite des travaux dans ce domaine permettra de diminuer le temps d'attente des camions aux entrées de sites et d'améliorer par le fait même, la compétitivité des entreprises.

RÉFÉRENCES

Akpan, N., Ojekudo, N., & Akpofure. (2013). Queuing Theory and its Application in Waste Management Authority (A Focus on Lawma Igando Dump Site, Lagos State). *4*, 4-438

ANL, l. i. d. r. (2018). *Idling reduction savings*. Retrieved from https://www.anl.gov/sites/www/files/2018-02/idling_worksheet.pdf

Asefi, Y., Gohari Mahmoudabad, A., Habibian Sezavar, A., Mirshahvaladi, S., Abyadeh, M., & Abyareh, M. (2020). Association between maternal cadmium exposure and preterm birth: a meta-analysis. *International Journal of Environmental Health Research*, 1-10

Aziziankohan, A., Jolai, F., Khalilzadeh, M., Soltani, R., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2017). Green supply chain management using the queuing theory to handle congestion and reduce energy consumption and emissions from supply chain transportation fleet. *Journal of Industrial Engineering and Management, 10*, 213

Beliën, J., De Boeck, L., & Van Ackere, J. (2012). Municipal Solid Waste Collection and Management Problems: A Literature Review. *Transportation Science, 48*

Briesemeister, R., & Novaes, A. G. N. (2017). Comparing an Approximate Queuing Approach with Simulation for the Solution of a Cross-Docking Problem. *Journal of Applied Mathematics, 2017*, 4987127

Caterpillar. (2014). Estimation owning operating costs.

Chen, G., Govindan, K., & Golias, M. M. (2013). Reducing truck emissions at container terminals in a low carbon economy: Proposal of a queueing-based bi-objective model for optimizing truck arrival pattern. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 55*, 3-22

Chen, G., Govindan, K., & Yang, Z. (2013). Managing truck arrivals with time windows to alleviate gate congestion at container terminals. *International Journal of Production Economics, 141*(1), 179-188

Chen, G., & Yang, z. (2014). Methods for estimating vehicle queues at a marine terminal: A computational comparison. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 24*, 611-619

Clott, C., Hartman, B. C., Ogard, E., & Gatto, A. (2015). Container Repositioning and Agricultural Commodities: Shipping Soybeans by Container from US Hinterland to Overseas Markets. *Research in transportation business and management, 14*, 56-65

Dekker, R., Heide, S. v. d., Asperen, E. V., & Ypsilantis, P. (2013). A chassis exchange terminal to reduce truck congestion at container terminals. *Flexible Services and Manufacturing Journal, 25*, 528-542

États-Unis, D. d. l. é. d. g. d. (2016). *Vehicle Technologies Market Report*. Retrieved from https://tedb.ornl.gov/wpcontent/uploads/2019/04/2016_Vehicle_Technologies_Market_Report.pdf

Fleming, M., Huynh, N., & Xie, Y. (2013). Agent-Based Simulation Tool for Evaluating Pooled Queue Performance at Marine Container Terminals. *Transportation Research Record, 2330*(1), 103-112

Huynh, N. (2009). Reducing Truck Turn Times at Marine Terminals with Appointment Scheduling. *Transportation Research Record, 2100*(1), 47-57

Kuznetsov, A., Kirichenko, A., & Slitsan, A. (2017). Simulation for assessment of bulk cargo berths number. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 87*, 062010

Lima, A. D. P., Werner de Mascarenhas, F., & Frazzon, E. M. (2015). Simulation-Based Planning and Control of Transport Flows in Port Logistic Systems. *Mathematical Problems in Engineering, 2015*, 862635

Lirn, T.-C., & Wong, R.-D. (2012). Determinants of grain shippers' and importers' freight transport choice behaviour. *Production Planning & Control - PRODUCTION PLANNING CONTROL, 24*, 1-14

Matsuda, T., Hanaoka, S., & Kawasaki, T. (2020). Cost analysis of bulk cargo containerization. *Maritime Policy & Management, 47*

Mohtashami, Z., Aghsami, A., & Jolai, F. (2020). A green closed loop supply chain design using queuing system for reducing environmental impact and energy consumption. *Journal of Cleaner Production, 242*, 118452

Mokshin, V. V., Kirpichnikov, A. P., & Soiko, A. I. (2019). Simulation and optimization of the cargo terminal in the AnyLogic environment. *Journal of Physics: Conference Series, 1368*, 042082

Québec, G. d. (2015). Méthodologie QC.27 déterminée par le gouvernement du Québec sur la déclaration obligatoire de certaines émissions de contaminants dans l'atmosphère

Recyc-Québec. (2012). Bilan de la gestion des matières résiduelles au Québec Retrieved from https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/bilan-gmr-2012.pdf

Recyc-Québec. (2019). Rapport annuel. Retrieved from https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/rapport-annuel-2019-2020vF.pdf

Rodrigue, J.-P., & Notteboom, T. (2014). Looking Inside the Box: Evidence from the Containerization of Commodities and the Cold Chain. *Maritime Policy & Management, 42*

Shahram fard, S., & Vahdani, B. (2019). Assignment and scheduling trucks in cross-docking system with energy consumption consideration and trucks queuing. *Journal of Cleaner Production, 213*, 21-41

Smith, D., & Srinivas, S. (2019). A simulation-based evaluation of warehouse check-in strategies for improving inbound logistics operations. *Simulation Modelling Practice and Theory, 94*, 303-320

St-Germain, J. (2013). Bannissement du bois de l'élimination : alternatives accessibles aux industries, commerces et institutions estriens. .

Ulubeyli, S., Kazaz, A., & Arslan, V. (2017). Construction and Demolition Waste Recycling Plants Revisited: Management Issues. *Procedia Engineering, 172*, 1190-1197

Vahdani, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., Modarres, M., & Baboli, A. (2012). Reliable design of a forward/reverse logistics network under uncertainty: A robust-M/M/c queuing model. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 48*(6), 1152-1168

Wang, L., & Zhu, X. (2019). Container Loading Optimization in Rail–Truck Intermodal Terminals Considering Energy Consumption. *Sustainability, 11*, 2383

Wang, R., Yang, K., Yang, L., & Gao, Z. (2018). Modeling and optimization of a road-rail intermodal transport system under uncertain information. *Eng. Appl. Artif. Intell., 72*, 423-436

Wu, H., Zuo, J., Zillante, G., Wang, J., & Yuan, H. (2019). Status quo and future directions of construction and demolition waste research: A critical review. *Journal of Cleaner Production, 240*, 118163

Zhang, X., Zeng, Q., & Yang, Z. (2019). Optimization of truck appointments in container terminals. *Maritime Economics & Logistics, 21*(1), 125-145

Zhao, W., & Goodchild, A. (2010). The impact of truck arrival information on container terminal rehandling. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 46*, 327-343

Zhao, W., & Goodchild, A. (2013). Using the truck appointment system to improve yard efficiency in container terminals. *Maritime Economics & Logistics, 15*

Annexe 1

Programme de la génération des instances

```
Option Explicit
Option Base 0
Private Sub Random_Generator()
Dim i, j, k, m, n, o, x, y, z As Integer
Dim Customers(), Task_Type(), Task_Order() As Integer
Dim Sum As Integer
Dim Num_One, Num_Three, Rnd_Num As Integer
ReDim Customers(55, 155)
ReDim Task_Type(55, 155)
ReDim Task_Order(55, 155)
Num_One = 2
Num_Three = 2
Worksheets("Feuill").Activate
Do While i < 51
Sum = 0
j = 1
Do While Sum < 20
Customers(i, j) = Int(2 * Rnd)
Sum = Customers(i, j) + Sum
j = j + 1
Loop
Sum = 0
j = 51
Do While Sum < 20
Customers(i, j) = Int(2 * Rnd)
Sum = Customers(i, j) + Sum
j = j + 1
Loop
Sum = 0
j = 101
Do While Sum < 20
Customers(i, j) = Int(2 * Rnd)
Sum = Customers(i, j) + Sum
```

```
j = j + 1
Loop
i = i + 1
Loop
For i = 1 To 50
For j = 1 To 150
If Customers(i, j) <> 1 Then
Customers(i, j) = 0
End If
Next j
Next i
For i = 1 To 50
For j = 1 To 150
Cells(i + 1, j).Value = Customers(i, j)
Next j
Next i
''''''''''''''
Dim myStart As Long
Dim myEnd As Long
Dim b As Long
Dim a()
myStart = 1
myEnd = 20
ReDim a(0 To myEnd - myStart)
For i = 1 To 50
With CreateObject("System.Collections.SortedList")
Randomize
For b = myStart To myEnd
.Item(Rnd) = b
Next b
For b = 0 To .Count - 1
a(b) = .GetByIndex(b)
Next
End With
x = 0
For j = 1 To 50
```

```
If Customers(i, j) = 1 Then
Task_Type(i, j) = 2
x = x + 1
If x = a(1) Then
Task_Type(i, j) = 1
ElseIf x = a(2) Then
Task_Type(i, j) = 1
ElseIf x = a(3) Then
Task_Type(i, j) = 3
ElseIf x = a(4) Then
Task_Type(i, j) = 3
End If
End If
Next j
Next i
''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''
For i = 1 To 50
With CreateObject("System.Collections.SortedList")
Randomize
For b = myStart To myEnd
.Item(Rnd) = b
Next b
For b = 0 To .Count - 1
a(b) = .GetByIndex(b)
Next
End With
x = 0
For j = 51 To 100
If Customers(i, j) = 1 Then
Task_Type(i, j) = 2
x = x + 1
If x = a(1) Then
Task_Type(i, j) = 1
ElseIf x = a(2) Then
Task_Type(i, j) = 1
ElseIf x = a(3) Then
```

```
Task_Type(i, j) = 3
ElseIf x = a(4) Then
Task_Type(i, j) = 3
End If
End If
Next j
Next i
''''''''''''''''''''''''
For i = 1 To 50
With CreateObject("System.Collections.SortedList")
Randomize
For b = myStart To myEnd
.Item(Rnd) = b
Next b
For b = 0 To .Count - 1
a(b) = .GetByIndex(b)
Next
End With
x = 0
For j = 101 To 150
If Customers(i, j) = 1 Then
Task_Type(i, j) = 2
x = x + 1
If x = a(1) Then
Task_Type(i, j) = 1
ElseIf x = a(2) Then
Task_Type(i, j) = 1
ElseIf x = a(3) Then
Task_Type(i, j) = 3
ElseIf x = a(4) Then
Task_Type(i, j) = 3
End If
End If
Next j
Next i
For i = 1 To 50
```

```
For j = 1 To 150
If Customers(i, j) <> 1 Then
Task_Type(i, j) = 0
End If
Next j
Next i
''''''''''''''''''''''''''
For i = 1 To 50
For j = 1 To 150
Cells(i + 59, j).Value = Task_Type(i, j)
Next j
Next i
''''''''''''''''''''''''''''''''''
myStart = 1
myEnd = 61
ReDim a(0 To myEnd - myStart)
For i = 1 To 50
With CreateObject("System.Collections.SortedList")
Randomize
For b = myStart To myEnd
.Item(Rnd) = b
Next b
For b = 0 To .Count - 1
a(b) = .GetByIndex(b)
Next
End With
k = 1
For j = 1 To 150
If Customers(i, j) = 1 Then
Task_Order(i, j) = a(k)
k = k + 1
End If
Next j
Next i
''''''''''''''''''''''''''''''''
i = 0
```

```
j = 0
For i = 1 To 50
For j = 1 To 150
Cells(i + 119, j).Value = Task_Order(i, j)
Next j
Next i
End Sub
```