

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE
CONCENTRATION GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT
M. Ing.

PAR
GEORGE AL-MAALOUF

ÉLABORATION D'UNE STRUCTURE DE COLLECTE DES MATIÈRES
RÉSIDUELLES SELON LA THÉORIE CONSTRUCTALE

MONTRÉAL, LE 18 SEPTEMBRE 2012

©Tous droits réservés, George Al-Maalouf

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Robert Hausler directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Mathias Glaus codirecteur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Yannic Ethier, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Valérie Laforest, examinateur externe
École Nationale Supérieure des Mines de Saint Étienne

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 21 AOÛT 2012

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

Né dans un pays où l'environnement est l'un des derniers soucis, j'étais déterminé dès ma jeunesse à poursuivre un parcours universitaire lié à l'environnement. Malheureusement, et à cause de plusieurs limitations dans le système éducatif dans mon pays, je n'ai pas pu accomplir mon objectif. En 2008, j'ai eu la chance d'immigrer vers le Canada, ce pays qui m'as reçu les bras ouverts, m'as également donné la chance de compléter mon cheminement universitaire tel que j'ai toujours voulu.

La gestion des déchets m'a toujours fasciné. De nos jours, les sociétés sont de plus en plus consommatrices, ce qui pose un défi au niveau de la gestion des déchets. Plus de quantités à gérer, plus de technologies spécifiques à chaque type de déchets et plus de filières viennent s'ajouter dans le cycle de la gestion des matières résiduelles. Tout cela pose un problème au niveau du transport de ces matières. Comment diffuser les différentes quantités de déchets tout en limitant le plus que possible les coûts et les effets sur l'environnement?

Dans cette étude, je tente de répondre à cette question tout en proposant une nouvelle approche basée sur une théorie déterministe : la théorie constructale.

REMERCIEMENTS

Avant d'aborder mon sujet, je tiens à remercier mon directeur Robert Hausler avec qui les discussions allaient toujours au-delà du présent pour franchir les barrières du futur inconnu. Ses conseils et ses remarques constructives m'ont aidé à mieux comprendre le domaine et à attaquer les problèmes sous plusieurs perspectives.

Je tiens à remercier également mon co-directeur Mathias Glaus, qui m'as toujours guidé sur la bonne voie tout le long de ma maîtrise. Mathias, même si j'écris des lignes et des lignes je ne saurais jamais traduire en mots ma gratitude envers toi. Après chaque rencontre avec toi, j'avais l'impression que j'étais capable de résoudre tous les problèmes du monde. Grand merci.

Mes remerciements vont aussi à Valérie Laforest et Jacques Bourgois, professeurs à l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne. Ils m'ont accueilli au sein de l'équipe de recherche du centre SITE et m'ont introduit aux différentes approches de gestion des matières résiduelles en France. Merci également aux étudiants et membres du centre SITE : Valentine, Jonathan, Gaël, Aida, Mariana, Georges, Christiane et Zahia. Même si je perdais tout le temps au squash, j'ai passé des moments inoubliables avec vous!

Je remercie également mes parents et mes deux frères pour le support inconditionnel sans lequel je n'aurais sans doute pas pu franchir les différents obstacles rencontrés durant ma maîtrise.

Enfin, un grand merci à mes amis Jade, Rami et Jinane pour leur grand support.

ÉLABORATION D'UN OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION POUR OPTIMISER LA COLLECTE DE MATIÈRES RÉSIDUELLES SELON LA THÉORIE CONSTRUCTALE

GEORGE AL-MAALOUF

RÉSUMÉ

À l'heure actuelle, la collecte représente plus de 80% des coûts générés par la gestion des matières résiduelles (MR). Afin de réduire ces coûts, une solution actuelle réside dans l'implémentation de centres de transbordement, ce qui permet une consolidation de la charge d'au moins 3 camions de collecte dans un grand camion de transport. Cette réduction découle du principe d'économie d'échelle appliqué au secteur du transport. Cette solution améliore la rentabilité du système sans toutefois l'optimiser. Les récentes études montrent que la phase de collecte à l'aide de camions compacteurs génère des pertes significatives causées principalement par les arrêts fréquents ainsi que le transport vers les centres de transbordements souvent éloignés de la zone de collecte. La présente étude suggère une restructuration de la hiérarchie dans la collecte des matières résiduelles, proposant ainsi la division des phases de collecte et de transport vers le centre de transbordement. Afin d'atteindre cette finalité, une théorie déterministe : « la théorie constructale » (TC) est utilisée. Les résultats montrent qu'à partir d'une certaine densité seuil, l'application de la TC minimise les pertes économiques dans le système. En fait, la collecte est optimale si elle est effectuée à l'aide d'une combinaison de véhicules à faible capacité pour la collecte porte-à-porte, et de véhicules à grande capacité pour la collecte aux points de rupture de charge ainsi que le transport vers le centre de transbordement. Afin de minimiser les coûts de main d'œuvre, la présente étude propose l'utilisation du Système de Transport Cybernétique (STC) comme véhicule de collecte automatisée pour la collecte de faibles quantités de MR. Enfin, la méthode d'optimisation proposée s'inscrit dans une optique de décentralisation de la collecte et du traitement des matières résiduelles. Cette dernière permet ainsi l'implémentation d'une gestion multi-filières des MR à l'échelle locale d'un territoire.

Mots clés : Collecte des matières résiduelles, théorie constructale, Système de Transport Cybernétique.

ÉLABORATION D'UN OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION POUR OPTIMISER LA COLLECTE DE MATIÈRES RÉSIDUELLES SELON LA THÉORIE CONSTRUCTALE

GEORGE AL-MAALOUF

ABSTRACT

Currently, more than 80% of the waste management costs are attributed to the waste collection phase. In order to reduce these costs, one current solution resides in the implementation of waste transfer stations. In these stations, at least 3 collection vehicles transfer their load into a larger hauling truck. This cost reduction is based on the principle of economy of scale applied to the transportation sector. This solution improves the efficiency of the system; nevertheless, it does not optimize it. Recent studies show that the compactor trucks used in the collection phase generate significant economic losses mainly due to the frequent stops and the transportation to transfer stations often far from the collection area. This study suggests the restructuring of the waste collection process by dividing it into two phases: the collection phase, and the transportation to the transfer station phase. To achieve this, a deterministic theory called: "the Constructal Theory" (CT) is used. The results show that starting a certain density threshold, the application of the CT minimizes energy losses in the system. In fact, the collection is optimal if it is done using a combination of low capacity vehicle to collect door to door and transfer their charge into high-capacity trucks. These trucks will then transport their load to the transfer station. To minimize the costs of labor, this study proposes the use of Cybernetic Transport System (CTS) as an automated collection vehicle to collect small amounts of waste. Finally, the optimization method proposed is part of a decentralized approach to the collection and treatment of waste. This allows the implementation of multi-process waste treatment facilities on a territory scale.

Keywords: Waste collection, Constructal Theory, Cybernetic Transportation Systems.

3.4.1	Effet de la densité sur la collecte	54
3.5	Analyse des résultats.....	55
CHAPITRE 4	DISCUSSION	57
4.1	Le modèle et son application	57
4.1.1	Véhicules alternatifs.....	58
4.1.2	Les retombées socio-économiques	59
4.1.3	Les retombées environnementales	60
4.2	Perspectives.....	61
4.3	Recommandations.....	63
CONCLUSION	65	
ANNEXE I	LES ALGORITHMES DE ROUTAGE	67
ANNEXE II	LES STC ACTIFS	69
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		71

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Comparaison de la gestion des matières résiduelles entre Montréal et Saint-Étienne	8
Tableau 1.2 Les impacts environnementaux de la collecte avec un camion compacteur de 9 tonnes	17
Tableau 1.3 Coûts de la collecte avec un camion compacteur de 9 tonnes	17
Tableau 1.4 Le résultat de la minimisation des coûts selon la théorie constructale.	28
Tableau 2.1 Paramètres utilisés dans le modèle.....	38
Tableau 3.1 Paramètres de bases dans les phases de collecte et transport.....	43
Tableau 3.2 les spécificités territoriales du modèle	44
Tableau 3.3 Comparaison entre les unités utilisées dans cette étude et les unités de la constructale	46
Tableau 3.4 Capacités des véhicules de collecte et de transport.....	48
Tableau 3.5 Comparaison entre les variables de l'équation de Bejan.....	50
Tableau 3.6 coûts de l'application de la collecte constructale au territoire étudié.....	52
Tableau 3.7 coûts de la collecte conventionnelle du territoire étudié.....	53
Tableau 4.1 Pourcentages de carburant et de main d'œuvre pour K_0 , K_1 et K_2	59

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 La pyramide des 4RV-E.....	6
Figure 1.2 Cycle de vie d'un produit.....	12
Figure 1.3 Les procédés de valorisation des matières résiduelles.....	14
Figure 1.4 Cycle de la collecte des matières résiduelles.....	15
Figure 1.5 Camion de collecte conventionnelle.....	16
Figure 1.6 Types de camions de collecte modernes.....	16
Figure 1.7 La capacité du camion en fonction du taux de participation de la population.....	20
Figure 1.8 Variation de l'efficacité d'un moteur en fonction de sa vitesse.....	21
Figure 1.9 Camions bennes à faible capacité.....	22
Figure 1.10 Illustration d'un véhicule STC.....	23
Figure 1.11 Représentation graphique de la zone à collecter.....	26
Figure 1.12 Représentation graphique du niveau élémentaire.....	27
Figure 1.13 Représentation graphique du deuxième niveau.....	28
Figure 2.1 La surface élémentaire choisie à l'aide de Google Earth.....	33
Figure 2.2 La consommation d'un camion en mode ralenti en fonction de sa capacité.....	36
Figure 2.3 La consommation d'un camion en mode de collecte en fonction de sa capacité.....	36
Figure 2.4 La consommation d'un camion en mode de transport en fonction de sa capacité.....	37
Figure 3.1 Représentation des flux dans le modèle.....	40
Figure 3.2 K_0 , K_1 et K_2 en fonction de m_1	49
Figure 3.3 Représentation des niveaux 1 et 2 de la théorie constructale appliquée à la collecte des matières résiduelles.....	51
Figure 3.4 Coûts de la collecte des MR sujets à une variation de la densité de la population.....	54

Figure 3.5 Capacités des camions dans les scénarios Constructal et conventionnel55

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

COV	Composés Organiques Volatils
MR	Matières Résiduelles
<i>NIMBY</i>	<i>Not In My BackYard</i>
<i>PRT</i>	<i>Personal Rapid Transit</i>
PT	Particules Totales
RDD	Résidus Domestiques Dangereux
STC	Système de Transport Cybernétique
TC	Théorie constructale

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

i		Niveau de collecte
A_i	(km^2)	Aire du territoire au niveau i
L_i	(km)	Longueur du territoire au niveau i
H_i	(km)	Largeur du territoire au niveau i
γ	(t/km^2)	Densité des matières résiduelles
K_i	($\$/(\text{t}.\text{km})$)	Coût d'un flux unitaire au niveau i
m_i	(t)	Quantité totale de MR générées au niveau i
n_i		Nombre de niveaux $i-1$ dans un niveau i
C_i	($\$$)	Coût total de la collecte au niveau i
N_e		Nombre de travailleurs dans un camion
S_c	($\$/\text{h}$)	Salaire du chauffeur du camion
S_r	($\$/\text{h}$)	Salaire d'un collecteur
v_c	(km/h)	Vitesse moyenne du camion en zone de collecte
v_t	(km/h)	Vitesse moyenne du camion durant le transport
d_0	(km)	Distance parcourue au niveau 0
P	(hab/km^2)	Densité de la population
Ψ	($\text{t}/\text{hab}/\text{jr}$)	Quantité de MR générées par habitant par jour
Q_i	(t)	Charge moyenne d'un camion de collecte au niveau i
hab_l	(hab)	Nombre d'habitant par logement
l_e		Nombre de logements par entrée
e_a		Nombre d'entrées par arrêt
c_s		Fréquence de la collecte par semaine
f_c	($\$/\text{l}$)	Coût d'un litre de carburant
V_T	(m^3)	Volume des matières résiduelles
V_p	($\text{m}^3/\text{arrêt}$)	Volume des matières résiduelles collectées par arrêt
R		Taux de compactage dans un camion
t_p	(h)	Temps moyen pour collecter les matières sur un arrêt
H	(h)	Nombre d'heures dans une journée de travail
N_d		Nombre de voyage au centre de transbordement

XXII

x	(km)	Distance au centre de transbordement.
s	(km/h)	Vitesse moyenne du transport vers le centre de transbordement
t_d	(h/voyage)	Temps de retard dans un voyage au centre de transbordement
t_u	(h/voyage)	Temps de décharge du camion dans le centre de transbordement
B	(h)	Temps de repos des travailleurs

INTRODUCTION

La prise de conscience des effets des activités humaines sur l'environnement s'est manifestée à la fin des années 60 et s'est concrétisée par la tenue de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement à Stockholm en 1972. La notion d'une planète aux ressources limitées (spatialement et temporellement) a engendré la nécessité de revoir les modèles de développement et de consommation des matières premières afin de répondre aux besoins des différentes sociétés. La nécessité de préserver les ressources et de minimiser l'empreinte environnementale des activités humaines repose entre autres sur une approche qui considère les matières résiduelles (MR) comme des ressources à réutiliser, recycler et valoriser afin de minimiser les impacts associés à l'enfouissement des déchets.

La transformation des matières résiduelles en « matières premières secondaires » (Skitt, 1992) nécessite une gestion multi-filières qui consiste à trier les matières pour ensuite les transporter vers différentes filières de traitement selon la nature du déchet. Le coût de la collecte et du transport des MR représente plus de 80% des coûts totaux de la gestion des MR. Les principaux facteurs étant la consommation de carburant des camions-bennes de collecte ainsi que le salaire du chauffeur et des collecteurs¹ (Davis et Cornwell, 1999).

Plusieurs études ont abordé le problème de collecte et de transport dans le but d'optimiser l'efficacité du système actuel (Larsen et al., 2009b; Sahoo et al., 2005; Ustundag et Cevikcan, 2008). L'emphase dans ces études a été mise sur la réduction du temps total de collecte en créant des systèmes d'optimisation des routes parcourues par le camion (Tavares et al., 2009) ou en analysant l'emplacement des centres de transfert (Eshet et al., 2007). Dans la plupart des systèmes de collecte, plusieurs camions de capacité fixe (entre 7 et 12 tonnes) sont utilisés pour desservir un territoire. Le choix de la capacité du camion est généralement

¹ Ce document considère un « collecteur » comme étant la personne responsable de ramasser les MR résidentielles et les jeter dans un camion compacteur

pris sans tenir compte de la densité ni de la superficie du territoire à desservir, ce qui augmente les probabilités de rouler des kilomètres à vide.

La présente étude vise l'application d'une théorie déterministe : la théorie constructale (TC) dans le but de déterminer sur une base économique la capacité optimale d'un véhicule de collecte de MR en tenant compte des paramètres caractérisant un territoire cible (tels que la densité de la population, la superficie du territoire, la largeur des rues, la superficie des ménages, etc.). Le présent document est subdivisé en quatre chapitres. Le premier présente la revue de la littérature associée à la gestion des MR, aux aspects plus spécifiques des phases de collecte et de transport ainsi que la présentation des principes de la théorie constructale (TC). Le deuxième chapitre aborde la méthodologie employée dans le cadre de ces travaux. Les troisième et quatrième chapitres présentent respectivement les résultats et la discussion. Finalement, le document aborde la conclusion et les recommandations qui découlent des travaux réalisés.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce premier chapitre aborde dans un premier temps l'historique et les programmes de gestion des MR et plus spécifiquement de la phase de collecte. Subséquemment, une revue des différentes approches dans le domaine de la collecte et du transport est traitée, suivie par une présentation de la théorie constructale.

1.1 Introduction

En 1980, le biologiste Paul Ehrlich reconnu pour son ouvrage « *The Population Bomb* » (Ehrlich, 1968), et l'économiste Julian Simon auteur de « *The Ultimate Resource* » (Simon, 1998), ont parié sur l'évolution du prix des ressources naturelles sur un horizon de dix ans, considérant les besoins croissants et l'épuisement potentiel des ressources. Le pari concernait la valeur de cinq métaux sur le marché : le cuivre, le chrome, le nickel, l'étain et le tungstène. Ehrlich prédisait que les prix augmenteraient, Simon, quant à lui, prévoyait qu'ils diminueraient. Dix ans plus tard, l'économiste a gagné le pari. L'explication de ce résultat repose sur une production accélérée, basée sur un développement technologique, permettant ainsi de réduire les prix malgré une augmentation de la demande. Dans les années qui ont suivi, plusieurs études ont montré que ce ne fut qu'un simple hasard, et si le pari avait été fait sur une période de 20 ans, Ehrlich l'aurait gagné (Kiel, Matheson et Golembiewski, 2010; Philip, 2010).

S'inscrivant dans un cadre de préservation des ressources naturelles, le traitement² des matières résiduelles³ constitue une alternative à l'enfouissement traditionnel de ces matières. Toutefois, les différentes méthodes de traitements, requièrent des coûts supplémentaires,

² Dans le présent document, le terme « traitement » regroupe la réutilisation, le réemploi, la récupération, le recyclage, la valorisation et l'enfouissement.

³ Dans le présent document, le terme « matières résiduelles » se définit comme étant des matières qui, en totalité ou en partie, pourront être traitées afin d'en générer des matières premières.

notamment dans la phase de collecte et du transport vers les filières appropriées (Larsen et al., 2009b).

La problématique de la collecte et du transport des MR municipales a fait l'objet de plusieurs études (Chung, 2009; Hansen, 2000; PIKON et GASKA, 2010; Sonesson, 2000; Ustundag et Cevikcan, 2008; Wilson, 2001). La plupart de ces études traitent de l'amélioration du système d'un point de vue économique et logistique, notamment le développement de modèles d'optimisation basés sur des algorithmes de routage. Cependant, ces études n'abordent pas le choix de la capacité des camions de collecte avec une approche déterministe. Le problème de la collecte et du transport des MR remonte jusqu'à quelques milliers d'années et s'est amplifié avec l'évolution du mode de vie de l'être humain (Worrell et Vesilind, 2011).

1.2 Historique de la gestion des matières résiduelles,

Aussi loin que les années 8000 av. J.-C, quand l'être humain a abandonné le mode de vie nomade, les sédentaires ont appris à se débarrasser de leurs déchets loin de leur village. Dans le temps, les déchets étaient principalement des restes de nourritures, des coquilles, des os ou des articles ménagers. Le but principal à cette époque était d'une part de minimiser les odeurs nauséabondes, et d'autre part d'éloigner les vermines et les animaux sauvages (Worrell et Vesilind, 2011). Les déchets étaient transportés à pieds, et chacun transportait ses propres déchets. En Antiquité, les gens collectaient leurs résidus dans des récipients d'argiles, pour ensuite les transporter en vrac à l'aide de chars (Worrell et Vesilind, 2011). Vers 320 av. J.-C, les résidents d'Athènes transportaient leurs déchets à au moins deux kilomètres de la ville, et ce pour respecter un nouveau règlement concernant l'hygiène. Ce dernier étant employé après la création du premier site d'enfouissement dans l'histoire de l'homme moderne (Bilitewski, Härdtle et Marek, 2006). Malgré toutes les mesures préventives, des pandémies, telle que celle du choléra à Londres en 1831, ont certainement contribué aux recherches dans le domaine de la santé. Ainsi, les efforts de plusieurs scientifiques – notamment Thilenius, Louis Pasteur et Robert Koch – ont permis de montrer que les bactéries et les virus sont à

l'origine des maladies. De ce constat, les mesures de santé publique ont reposé sur une collecte et un traitement des déchets visant à minimiser la propagation des maladies (Lemann, 2008).

La ville de Londres a inauguré le premier centre d'incinération des déchets municipaux en Europe vers 1870. Ce dernier étant situé à proximité des logements afin de réduire les frais de transport. Dans la décennie qui a suivi, plusieurs autres villes en Angleterre ont construit leurs premières installations d'incinération. Cette filière est devenue le moyen privilégié pour minimiser les problèmes des déchets générés par les activités humaines et se débarrasser des déchets d'une manière peu coûteuse. Cependant, l'incinération a des effets indésirables tels que les cendres et les poussières projetées dans l'atmosphère et qui retombent dans le voisinage des installations. Ces effets ont engendré des objections de la part des citoyens directement touchés par ces retombées. Une des conséquences de ce phénomène est le syndrome « pas dans ma cour! » (NIMBY – *Not in my backyard*) (Coalition, 2001).

Il s'est avéré nécessaire par la suite de contrôler le processus de gestion des déchets de façon à organiser la collecte et le traitement tout en assignant des responsabilités à chacun des acteurs dans la société. D'où l'apparition de législations dans chaque ville et pays à travers le monde (Worrell et Vesilind, 2011). Au sujet du traitement des déchets, les réglementations en Amérique du Nord et en Europe respectent le principe des 4RV-E (ou 3RV-E⁴).

1.2.1 Les 4RV-E

À défaut d'une analyse de cycle de vie qui prouve le contraire, la réduction à la source, le réemploi, la récupération⁴, le recyclage la valorisation et enfin l'élimination du déchet ultime doivent être privilégiés dans cet ordre dans la gestion des MR (Québec, 2000). Cette

⁴ Certaines législations (tel que la PQGMR) incluent la récupération dans le processus de recyclage, changeant ainsi les 4RV-E en 3RV-E.

hiérarchie (Figure 1.1) constitue les prémisses aux politiques régissant les activités de la gestion des MR.

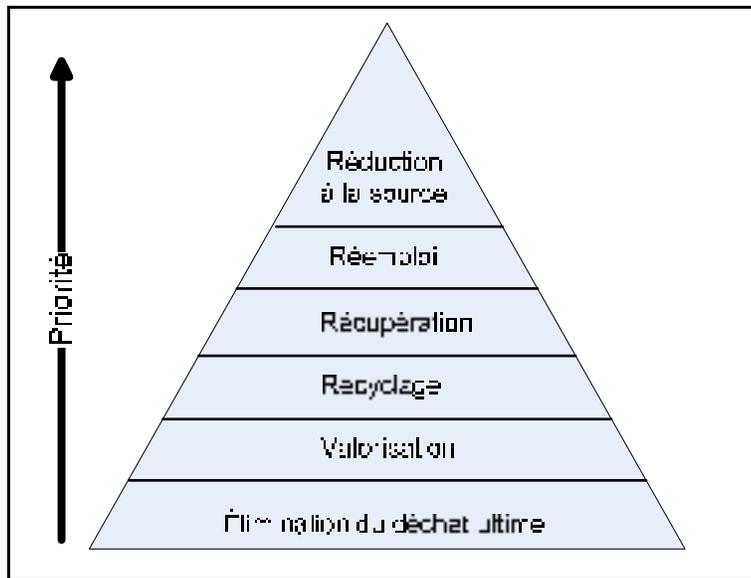


Figure 1.1 La pyramide des 4RV-E.

1.2.1.1 Définitions des 4RV-E

Dans son rapport intitulé « Déchets d’hier ressources de demain », le bureau d’audience publique sur l’environnement (BAPE) incite à remplacer le terme « déchets » par « matières résiduelles », dans le but de mettre l’accent sur la valeur de ces matières (BAPE, 1997). Le rapport propose également de traiter les matières résiduelles selon le principe des 4RV-E.

Les 4RV-E se définissent de manière générale comme suit (Québec, 2009) :

Réduction à la source :

En réduisant à la source, le fabricant, le distributeur ou l’utilisateur évitent de générer des MR. La photocopie recto-verso, les tasses à café réutilisables en sont des exemples.

Réemploi :

Le réemploi est la réutilisation d'un même produit à plusieurs reprises, sans changer ses fonctionnalités. À titre d'exemple, la vente de garage est une pratique courante de réemploi au Québec.

Récupération :

La récupération consiste à ramasser les matières recyclables pour ensuite les acheminer aux usines spécialisées afin de les retransformer en matières premières. La collecte sélective et les éco-centres en sont les principaux moyens au Québec.

Recyclage :

Le recyclage est l'intégration des matières récupérées dans le circuit de fabrication, de façon à en former des matières premières.

Valorisation :

La valorisation est la transformation d'un déchet en matières utiles (ex : le compostage) ou en énergie (ex : la bio-méthanisation).

Élimination :

L'élimination est la destination finale d'un déchet ultime. Les pratiques courantes d'élimination sont l'enfouissement et l'incinération.

Afin de respecter le principe des 4RV-E, les gouvernements ont déployé des plans de gestion des MR ayant comme objectif la minimisation de la gestion en bout de tuyau « *end-of-pipe*⁵ ». À titre d'exemple, le Tableau 1.1 compare la collecte des MR entre la ville de Montréal au Québec, et la ville de Saint-Étienne en France. À remarquer les objectifs de récupération similaires entre les deux villes.

Pour atteindre ces objectifs de récupération élevés, les municipalités autour du monde ont souvent recours à l'optimisation du processus de gestion des MR. Les villes lancent d'une part des campagnes de sensibilisation auprès des citoyens, dans le but de leur expliquer leur rôle dans le processus global de gestion des déchets. D'autre part, les municipalités visent

⁵ La gestion en bout de tuyau signifie l'élimination sans traitement (par enfouissement ou incinération) des déchets collectés.

l'optimisation de la collecte de MR, en organisant les flux de matières entre d'un côté, les ménages et d'un autre, les centres de transbordement, de réemploi, de recyclage, d'enfouissement et d'incinération (Kapepula et al., 2007). Pour aboutir à une optimisation des flux de matières, les preneurs de décisions doivent se baser sur des analyses de cycle de vie et des analyses multicritères afin de déterminer la disposition optimale des filières de traitement des MR, de façon à atteindre les objectifs économiques, environnementaux, et sociaux de la gestion des MR.

Tableau 1.1 Comparaison de la gestion des matières résiduelles entre Montréal et Saint-Étienne

Caractéristique	Unité	Saint-Étienne (source : Saint-Étienne (2010))		Montréal (source : Montréal (2008))	
		Résultats	Objectifs	Résultats	Objectifs
Superficie	km ²	80		499,1	
Population	hab	376 305		1 854 422	
Densité de la population	hab/km ²	2150,3		3716	
Mode de collecte	-	Porte à porte		Porte à porte	
Mode de tri des matières recyclables	-	Verre et emballage + JMR séparés		pêle-mêle	
Capacité des camions de collecte des non-recyclables	T	9		9	
Capacité des camions de collecte des recyclables	T	9		7	
Matières générées	kg/hab/an	387,22		550	
Matières récupérées		Résultats	Objectifs	Résultats	Objectifs
Fibres (papier, carton etc.)	% ⁶	37,3	60	53	60
Matières organiques	%6	-	60	8	60
Encombrants	%6	34	75	43	60
RDD	%6	-	75	54	75
Textiles	%6	-	60	1	50

Une principale composante du processus de gestion des MR est la phase de la collecte. Due à ses coûts élevés, la collecte des déchets a fait le sujet de plusieurs études dans le but d'optimiser le système de gestion (Alagöz et Kocasoy, 2008; Ismail et Loh, 2009; Tavares et

⁶ Le pourcentage des quantités récupérées par rapport au gisement de la matière.

al., 2009). Ces études se focalisent principalement sur l'optimisation de l'allocation des véhicules sur un territoire, sans nécessairement viser l'optimisation de la taille des véhicules.

1.2.2 La collecte

Dans cette partie, la collecte des MR est traitée avec une approche systémique. Les différents éléments du système de collecte sont présentés, les liens entre ces éléments ainsi qu'un aperçu des effets environnementaux engendrés seront également décrits.

1.2.3 Le cycle de collecte des matières résiduelles

Dans un cycle de la collecte des matières résiduelles, des camions de collecte ramassent les ordures et les recyclables du bord de la rue (ou de la déchetterie⁷) pour ensuite les transporter vers un centre de transfert (Figure 1.2). Une rupture de charge est appliquée sur les masses de déchets afin de les transférer vers des camions de capacité supérieure, et ce dans le but d'économiser les coûts de transport (Montréal, 2005).

⁷ Une déchetterie ou un éco-centre est un lieu d'apport volontaire destiné à trier les matières recyclables à la source.

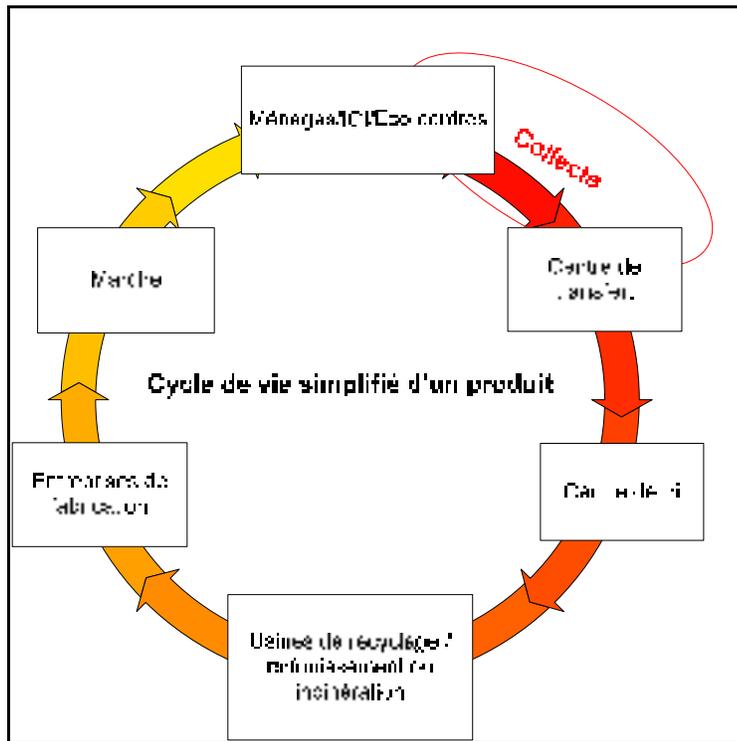


Figure 1.2 Cycle de vie d'un produit

Subséquentement, les matières recyclables sont dirigées vers des centres de tri, dans lesquels elles sont séparées en métal, verre, plastique et papier. Tandis que les déchets solides ainsi que les refus de tri sont conduits vers des sites d'enfouissement ou des stations d'incinération. Une partie des déchets enfouis ou incinérés est valorisée en énergie (Figure 1.3) à l'aide de procédés de traitement tels que la gazéification, la pyrolyse, l'incinération, etc. (Montréal, 2006). Les matières recyclables triées dans le centre de tri sont par la suite réintroduites comme matières premières dans différents cycles de production. Cette description générale ne s'applique pas nécessairement à tous les produits dans le marché. En effet, dépendamment du mode de collecte sur un territoire et le tri à la source, les produits peuvent suivre des cheminements spécifiques. À titre d'exemple, à Saint-Étienne en France, le verre est trié à la source par les citoyens séparément des autres matières recyclables. Par conséquent, la collecte achemine les contenants de verre directement vers les filières de recyclage ou valorisation sans passer par un centre de tri ou un centre de transbordement (Saint-Étienne, 2010).

La collecte et le transport des résidus domestiques représentent plus de 80% des coûts de la gestion des MR (Davis et Cornwell, 1999). Ce pourcentage élevé se justifie par les grandes distances parcourues sur le territoire desservi, ainsi que le temps nécessaire pour collecter chaque ménage (OSW, 2001). En outre, un véhicule de collecte de 9 tonnes consomme entre 0,5 l. et 1,30 l. de diesel par kilomètre, et effectue des arrêts fréquents devant chaque point de collecte. Par ailleurs, un tel camion exige la présence de deux à trois travailleurs (Corrales, 1996), soit un chauffeur et un ou deux collecteurs.

Dans un cycle de collecte des ordures ménagères, les camions compacteurs se déplacent en premier lieu du garage dans lequel ils sont stationnés et entretenus, vers la zone de collecte. Une fois arrivé sur le territoire, le camion s'arrête à chaque point de collecte et les collecteurs ramassent les sacs ou vident les bacs du bord de la rue dans le camion (Figure 1.4). Pour les déchets solides non-recyclables, les camions sont munis d'un système de compactage qui permet de réduire le volume avec un ratio pouvant atteindre 1/8 (180 à 500 kg/m³) (Apaydin et Gonullu, 2007).



Figure 1.3 Les procédés de valorisation des matières résiduelles.
Tirée de Montréal (2006, p. 10)

Une fois le compacteur rempli, la phase de collecte se termine et la phase de transport commence. Le camion transporte les MR vers un quai de transfert qui sert à effectuer des ruptures de charges des camions de collectes pour transférer les ordures dans des camions de plus grande capacité (ISWA, 2008). Dans certains cas, le quai de transfert offre des services de tri pour des matières recyclables, permettant ainsi le transport des matières recyclables vers un centre de tri (Saint-Étienne, 2010).

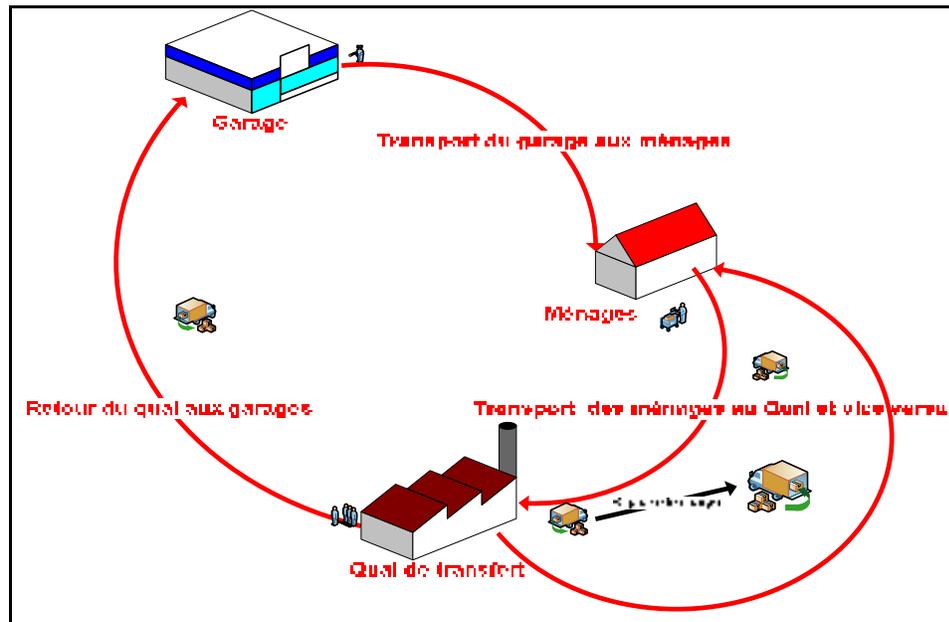


Figure 1.4 Cycle de la collecte des matières résiduelles

1.3 Les camions de collecte et leurs impacts

La méthode de collecte des déchets ménagers déposés en bordure de rue est la plus pratiquée dans le monde. Dans ce processus, les citoyens déposent leurs ordures dans des sacs en plastique ou dans des bacs roulants sur le bord de la rue. Des camions de collecte équipés d'un système de compactage hydraulique puissant traversent les rues pour collecter les déchets (Figure 1.5).

Plusieurs types de camions de collecte existent (NSW, 2008) :

- camion à chargement arrière (Figure 1.6 (a));
- camion à chargement latéral muni de bras automatisés (Figure 1.6 (b));
- camion à chargement avant muni d'un levier automatisé (Figure 1.6 (c));
- camion équipé de grue pour collecter les conteneurs d'apport volontaire (Figure 1.6 (d)).



Figure 1.5 Camion de collecte conventionnelle

Ces camions ont une capacité allant de 7 à 12 tonnes selon le type de matières collectées et les fréquences de passage hebdomadaire. Ils sont équipés de systèmes hydrauliques pour le compactage des matières afin de réduire leur volume.

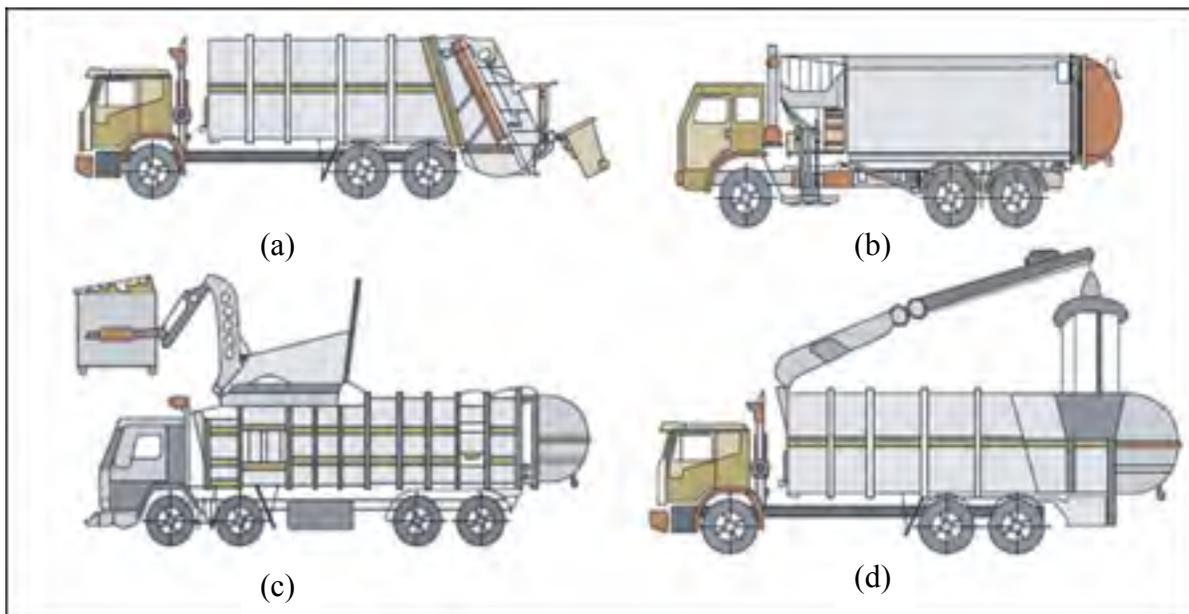


Figure 1.6 Types de camions de collecte modernes

Le processus de collecte produit plusieurs effets néfastes sur l'environnement (Tableau 1.2) et génère des coûts élevés (Tableau 1.3), d'où l'intérêt d'une optimisation se basant sur les deux axes : environnemental et économique.

Tableau 1.2 Les impacts environnementaux de la collecte avec un camion compacteur de 9 tonnes

Indicateur d'impact	Émission (1 camion)	Source
CO ₂	1577,4 g/km	(Larsen et al., 2009a)
NO _x	4,38 g/km	(Pastorello, Dilara et Martini, 2011)
Particules (PT)	0,01 g/km	(Pastorello, Dilara et Martini, 2011)
SO ₂	0,048 g/km	(Larsen et al., 2009a)
CO	1,32 g/km	(Larsen et al., 2009a)
Hydrocarbures	0,72 g/km	(Larsen et al., 2009a)
Composé Organique Volatile (COV)	2,19 g/km	(Pastorello, Dilara et Martini, 2011)
Bruit	100 dB	(Basrur, 2000)

Tableau 1.3 Coûts de la collecte avec un camion compacteur de 9 tonnes

Composante	Coût	Source
Carburant	50 à 60 l/100 km	(Ademe, 2006) (Emery et al., 2007)
Coût de location de véhicule	62 465 \$/année	(Emery et al., 2007)
Entretien (huile et assurance)	6 531 \$/année	(Emery et al., 2007)
Salaire des collecteurs (2)	49 641 \$/année	(Emery et al., 2007)
Salaire du chauffeur	28 955 \$/année	(Emery et al., 2007)

En plus des facteurs cités au Tableau 1.2 et au Tableau 1.3, la collecte par camion présente plusieurs effets indésirables au niveau social tels que (Galvez-Cloutier, 2010):

- la pollution visuelle générée par le passage des gros véhicules de collecte;
- le trafic causé par les camions;
- les odeurs produites par la combustion du carburant et le compacteur de déchets;
- les risques sur la santé publique causés par les émissions atmosphériques de la combustion du diesel;
- les risques d'incidents et de collision.

Compte tenu des risques environnementaux, économiques et sociaux, une optimisation de la collecte des MR offre des avantages considérables dans chacun de ces secteurs. Pour cela, plusieurs méthodes d'optimisation ont fait l'objet d'études scientifiques.

1.3.1 Méthodes d'optimisation de la collecte des matières résiduelles

Plusieurs méthodes d'optimisation de la collecte allant des règles basiques jusqu'aux algorithmes et systèmes complexes sont traitées dans la littérature.

1.3.1.1 Les règles d'arts et algorithmes de routage de la collecte des matières résiduelles

Afin de minimiser le temps associé au cycle d'une collecte, plusieurs règles doivent être respectées (Galvez-Cloutier, 2010) dont :

- la minimisation du chevauchement des routes;
- le premier point de collecte doit être proche du garage des camions;
- les rues à fort indice de congestion doivent être évitées pendant les heures de pointe;
- le trajet dans le sens des aiguilles d'une montre est préférable;
- minimiser les virages en U;
- sur une pente, la collecte doit se faire en descendant, et ce pour minimiser les coûts de carburant.

Ces règles basiques s'avèrent insuffisantes pour résoudre un problème de routage des véhicules de collecte des MR. Ce problème requiert des algorithmes de résolution avancés (Brajevic, 2011). Dépendamment de la complexité du système et des données disponibles, un des algorithmes du Tableau-A I- 1 (ANNEXE I) est choisi. Ces algorithmes considèrent la capacité des véhicules de collecte comme étant un paramètre à fournir, et non pas une finalité.

1.3.2 La capacité des camions de collecte

Pour calculer les coûts d'une collecte, des formules basées sur des estimations concernant les différentes variables sont utilisées. Dans le cas de la capacité du véhicule de collecte, l'équation (1.1) est utilisée (Masters et Ela, 1991) :

$$V_T(m^3) = \frac{V_p(m^3)}{rt_p(h)} \left[\frac{H(h)}{N_d} - \frac{2x(km)}{s(km/h)} - 2t_d(h) - t_u(h) - \frac{B(h)}{N_d} \right] \quad (1.1)$$

Où :

$V_T (m^3)$ = volume des MR ayant une densité moyenne D_T collectées par tournée par camion;

$V_p (m^3/arrêt)$ = volume moyen des MR collectées par arrêt;

r = taux de compactage;

$t_p (h)$ = temps moyen pour collecter les matières sur un arrêt, plus le temps pour atteindre le prochain arrêt;

$H (h)$ = nombre d'heures de travail dans une journée;

N_d = nombre de voyage au centre de transbordement;

$x (km)$ = distance au centre de transbordement;

$s (km/h)$ = vitesse moyenne du transport vers le centre de transbordement;

$t_d (h/voyage)$ = temps de retard dans un voyage au centre de transbordement;

$t_u (h/voyage)$ = temps de décharge du camion dans le centre de transbordement;

$B (h)$ = temps de repos des travailleurs.

L'équation (1.1) a été générée selon la méthode d'essais-erreurs, qui est fondée sur des hypothèses dont la validité dépend de la zone de collecte (Masters et Ela, 1991). En outre, la méthode de détermination de la capacité du camion de collecte ne prend pas en considération la densité de la population de la zone de collecte, qui pourrait affecter à la fois la quantité de matières générées par logement, et la distance à parcourir dans la zone de collecte avant que le camion se remplisse. Des études ultérieures telles que Everett et Shahi (1997) et Nguyen et Wilson (2010) ont démontré la relation entre la capacité (ou volume) d'un camion et la

densité de la population ou le taux de participation de la population en cas de collecte sélective (Figure 1.7).

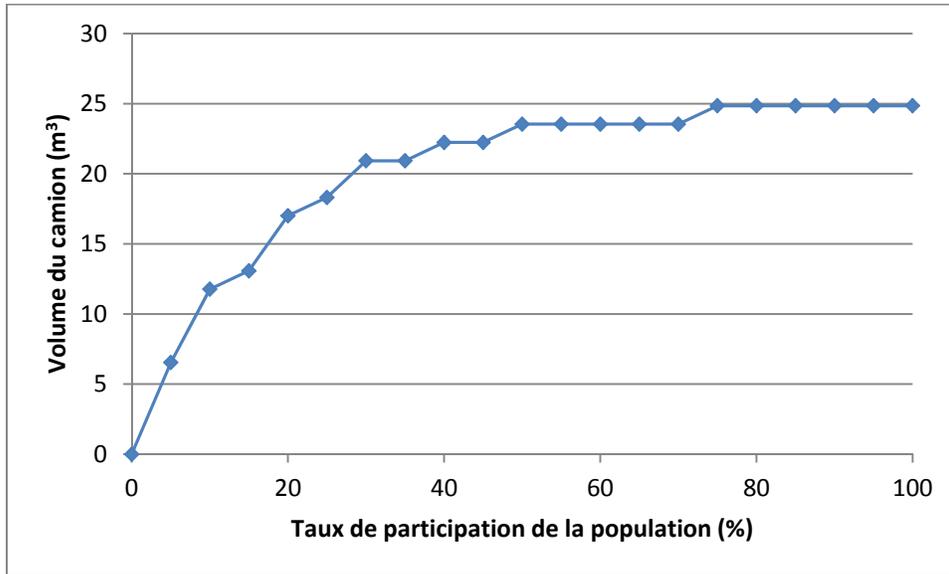


Figure 1.7 La capacité du camion en fonction du taux de participation de la population.

Adaptée de Everett et Shahi (1997, p. 638)

La Figure 1.7 découle d'une étude réalisée sur la collecte des déchets verts (feuilles d'arbres, tontes de gazon etc.) dans une zone résidentielle. Puisque la génération de ce genre de déchets est dotée d'une fréquence variable, les auteurs ont remarqué que la solution la plus économique sera d'adapter la taille des camions de collecte au taux de participation de la population (taux de génération des matières). L'allure de la courbe est logarithmique, elle montre une variation positive entre le volume du camion de collecte et le taux de participation de la population.

Par ailleurs, l'utilisation d'un même camion dans la phase de collecte et dans la phase de transport s'avère peu efficace d'un point de vue énergétique et économique. En fait, dans le domaine du transport, le principe de l'économie d'échelle⁸ prouve qu'un transport de biens sur de longues distances sans arrêts fréquents est plus économique si les biens sont

⁸ Une augmentation de la quantité transportée étant supérieure à l'augmentation du coût total de transport génère des coûts unitaires inférieurs.

transportés en vrac (Lorente et Bejan, 2010). Ce principe s'applique à la phase de transport entre les ménages et le centre de transbordement après que le camion soit rempli. Ceci est principalement dû à la distance élevée entre les ménages et le centre ainsi que l'absence d'arrêts fréquents. De plus, un camion de grande capacité génère des pertes énergétiques dans la phase de collecte (

Figure 1.8), principalement à cause des arrêts fréquents sur le parcours du camion, puisque le moteur atteint une grande vitesse de rotation après chaque démarrage (Knoke et Bocker, 2007).

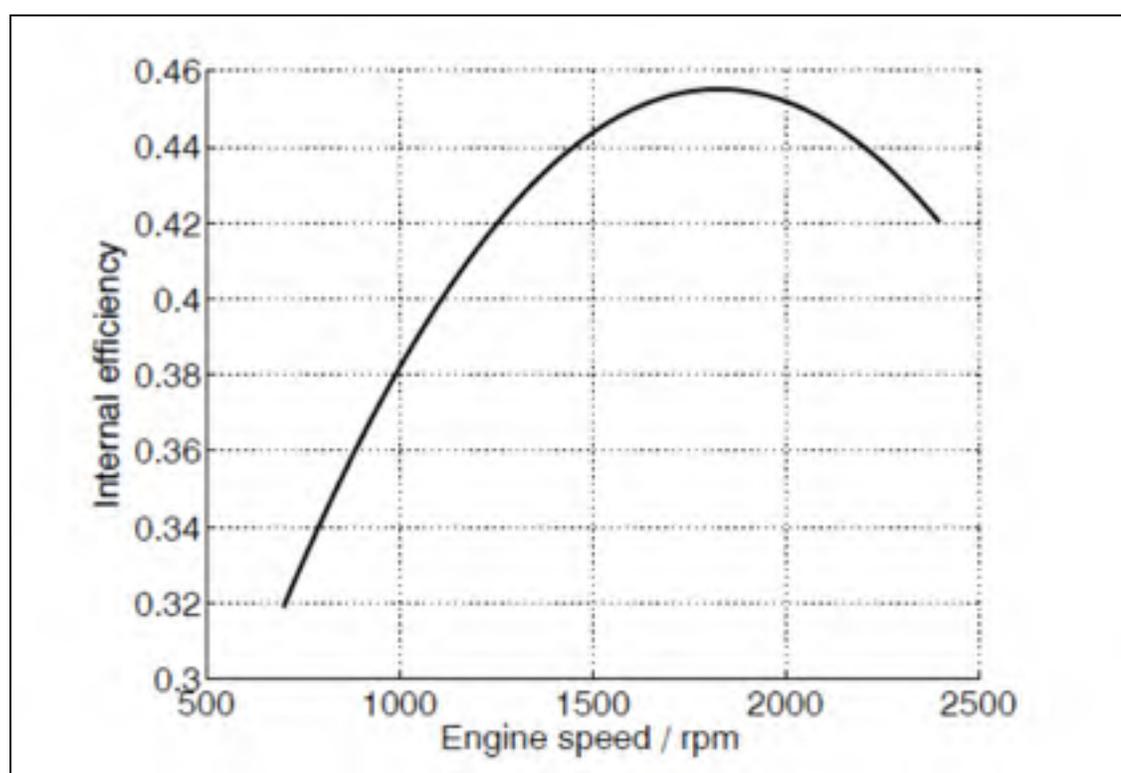


Figure 1.8 Variation de l'efficacité d'un moteur en fonction de sa vitesse.
Tirée de Knoke et Bocker (2007, p. 816)

Les camions de collecte de MR ont généralement une capacité allant de 7 à 12 tonnes (Galvez-Cloutier, 2010). Bien que le choix de la capacité soit suivant l'équation (1.1), plusieurs facteurs externes affectent ce choix, notamment :

- les ruelles étroites dans lesquelles les gros camions ne peuvent circuler;

- les différentes politiques sur les émissions, le bruit et les odeurs dans des milieux urbains;
- les zones piétonnes dans lesquelles aucun véhicule ne peut passer;
- l'évolution de la collecte sélective qui fait en sorte que les déchets soient collectés séparément, d'où la contrainte de parcourir des kilomètres additionnels pour remplir un camion.

Pour répondre à ces contraintes d'espace, les municipalités ont eu recours à des véhicules de capacité inférieure au camion conventionnel (Figure 1.9). Par ailleurs, et pour réduire les nuisances environnementales, l'utilisation de véhicules alimentés par le gaz naturel comprimé est une alternative privilégiée par certaines municipalités, surtout avec la présence de politiques de subventions adoptées dans plusieurs pays (Pastorello, Dilara et Martini, 2011). Une autre alternative se traduit par l'utilisation de camions électriques alimentés par les installations de transformation de déchets en énergie tel que la gazéification ou la biométhanisation (Denhag, 2011).



Figure 1.9 Camions bennes à faible capacité.
Tirée de Ominous (2011)

L'utilisation d'un véhicule de capacité inférieure à celle du camion conventionnel nécessite l'achat de plusieurs petits véhicules pour pouvoir desservir un territoire collecté auparavant par un seul véhicule de grande capacité. Par conséquent, le nombre de travailleurs (chauffeurs et collecteurs) se voit doubler ou tripler pour collecter une même zone. Dans

cette perspective, et avec l'avancement des nouvelles technologies de véhicules autonomes, il devient pertinent d'envisager une collecte automatisée (Sessa et al., 2007).

1.4 Les Systèmes de transport cybernétique

Depuis les années 50, de nouvelles technologies de transport individualisé ont émergé. Parmi ces technologies figure le *Personal Rapid Transit (PRT)* ou système de transport cybernétique (STC) (Anderson, Doyle et Macdonald, 1980). Un STC (Figure 1.10) est un système de transport automatisé dans lequel plusieurs véhicules autonomes contrôlés par une station centrale sont utilisés pour transporter des personnes, marchandises ou déchets (Glaus, Hausler et Bourgois, 2009). Au cours des années, plusieurs générations de STC ont été conçues, et de nouvelles technologies ont été déployées pour améliorer l'autonomie de ces véhicules et réduire les risques d'incidents. En 2007, 40 concepts de STC existaient (Cottrell et Mikosza, 2008), parmi lesquels 19 systèmes actifs (Figure-A II- 1 de l'ANNEXE II).

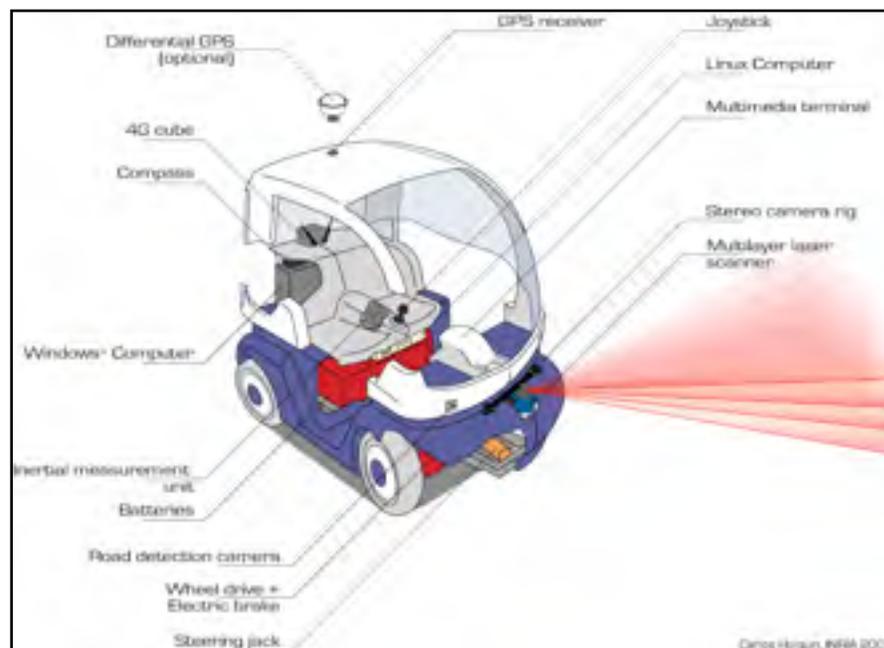


Figure 1.10 Illustration d'un véhicule STC.
Tirée de Benenson (2008, p. 134)

Pour démontrer la faisabilité des solutions de transport avancées, plusieurs projets Européens ont été envisagés tels que Cybercars, Cybercars 2, CyberMove, FACT, EDICT, CyberC3, NetMobil et CityMobil.

Le projet CityMobil est l'étude la plus récente des STC en date de rédaction de ce mémoire (2012). Trois projets pilotes de grande ampleur font partie de CityMobil. À l'aéroport de Heathrow à Londres, une flotte de véhicules autonomes connecte le stationnement et la nouvelle aérogare. À Rome, des cybercars (Figure 1.10) collectent les visiteurs à l'entrée de la ville et les ramènent au centre. À Castellón en Espagne, un autobus automatisé joint l'université au centre de la ville (Benmimou et al., 2009).

Avec l'introduction d'un véhicule de capacité relativement faible, la hiérarchie de la collecte des MR se modifiera, d'où la nécessité d'une loi ou méthode afin de déterminer les nouvelles constituantes du système de collecte.

Dans ce contexte s'inscrit la loi Constructale, une loi physique récente qui décrit le mécanisme de formation des structures dans plusieurs systèmes naturels.

1.5 La théorie constructale

Selon la théorie constructale, un niveau hiérarchique signifie une étape dans laquelle un véhicule de capacité unique est utilisé. Le plus bas niveau dans la hiérarchie est doté d'un véhicule de collecte/distribution ayant la capacité la plus faible dans le système. Les niveaux suivants se caractérisent par des véhicules de taille plus grande respectivement.

Soit :

A_i (m²) = surface du niveau i ;

C_i (\$) = coût total généré au niveau i ;

H_i (m) = largeur du niveau i ;

L_i (m) = longueur du niveau i ;

K_i (\$/m unité) = coût d'un flux unitaire au niveau i ;

m_i (unités/s) = débit de biens au niveau i ;

n_i = nombre de niveau $i-1$ dans un niveau i ;

γ (unité/s.m²) = Taux de production ou génération de bien par unité de surface.

D'après Adrian Bejan (2003), si un système de flux naturel (ex : un bassin de rivière, les vaisseaux sanguins, les éclairs, etc.) était doté d'un degré de liberté jugé suffisant pour pouvoir modifier sa propre configuration, le système adopterait une forme de façon à ce que les courants des flux internes aient un meilleur accès. Cette loi est nommée la loi Constructale et sa définition est la suivante :

« Pour qu'un système de flux persiste dans le temps (survive), sa configuration doit évoluer de telle sorte à ce qu'elle fournisse un accès de plus en plus facile aux courants qui le traverse (Bejan et Lorente, 2011)»

Avoir un meilleur accès dans ce cas signifie la diminution de la résistance globale aux flux de matière. D'après Bejan, les lois physiques existantes, notamment la thermodynamique décrivent les tendances des systèmes dans l'état d'un non-équilibre dans le temps, jusqu'à l'atteinte de l'équilibre : l'absence de flux internes. Mais ces lois, n'abordent pas la structure (forme) des flux pendant ce temps de transition. La loi Constructale a été conçue pour justifier cette structure déterministe (Bejan et Merckx, 2007).

La théorie constructale (TC) a été d'abord utilisée pour résoudre le problème de l'optimisation des flux de chaleur pour refroidir les composantes électroniques (Bejan, 2003), ensuite elle a été généralisée pour résoudre plusieurs problèmes de flux d'une surface (ou d'un volume) vers un point et vice-versa (Ghodoossi et Eğrican, 2003). Dans cette étude, l'intérêt est fixé à l'application de cette loi naturelle dans les dynamiques sociales, et plus précisément dans le transport (collecte ou distribution) de biens d'une surface (ville, village, zone etc.) vers un point (centre de transfert, centre de distribution etc.).

Soit la surface A , une zone dans laquelle il faut collecter (ou distribuer) des biens vers un (ou à partir d'un) point M situé sur la périphérie de cette zone (Figure 1.11). Le problème est de configurer les flux de biens de sorte que la résistance globale (dans ce cas le coût) soit minimale.

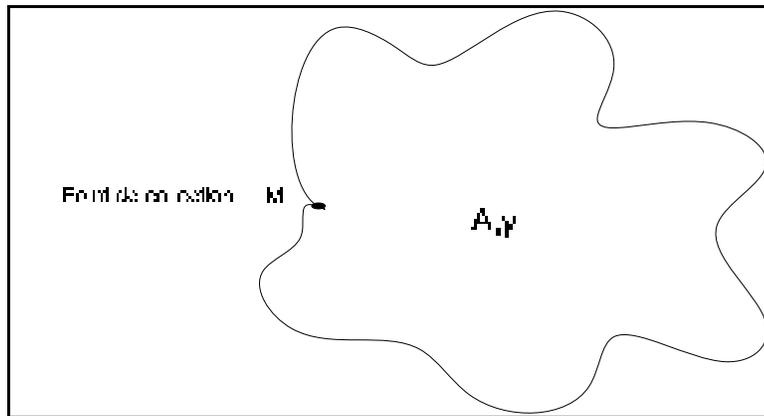


Figure 1.11 Représentation graphique de la zone à collecter
Adaptée de Bejan, Badescu et De Vos (2000, p. 1432)

Le principe économique de l'économie d'échelle affirme que les coûts sont minimaux si les biens sont transportés en masse sur une même distance (Lorente et Bejan, 2010) et que ces coûts sont également proportionnels à la distance parcourue. Le territoire est alors couvert de flux organisés hiérarchiquement du flux qui coûte le plus cher, vers le flux qui coûte le moins cher. Ce flux débute alors par l'élément qui coûte le plus cher (l'individu), et passe par une séquence d'intermédiaires (distributeurs, collecteurs) qui peuvent transporter des quantités supérieures de biens, pour arriver finalement à la destination (le point M). Les biens sont générés (ou commandés) à un taux constant γ (unité/(m.s²)). Le flux total $m = \gamma A$ (unité/s) parcourt A vers M (ou vice versa).

Plusieurs modes de transport existent pour collecter les biens et chaque mode est caractérisé par un coût K_i (\$/(unité.m)) de sorte que K_0 soit associé au mode de transport le plus cher ($K_0 > K_1 > K_2 \dots K_{i-1} > K_i$). Chaque K_i représente le coût par unité collectée par distance parcourue. Le problème consiste à couvrir A avec des flux à coûts K_i de façon à ce que le coût total pour transporter les biens vers M soit minimal. Considérant que la taille A_1 de la plus petite surface traversée par un flux supérieur à K_0 est **connue**, le ratio H_1/L_1 peut varier.

Cette surface appelée surface élémentaire (Figure 1.12) dont le flux est $m = \gamma A_1$ est traversée par un seul flux K_1 d'ordre 1. Chaque point P de la surface élémentaire est connecté au flux K_1 par un flux perpendiculaire de coût élémentaire supérieur K_0 . Donc les biens traversent A_1 avec deux modes de transport, le premier qui coûte le plus cher K_0 , le second K_1 qui coûte moins cher et transporte plus de biens pour atteindre le point M_1 sur la périphérie de la surface élémentaire.

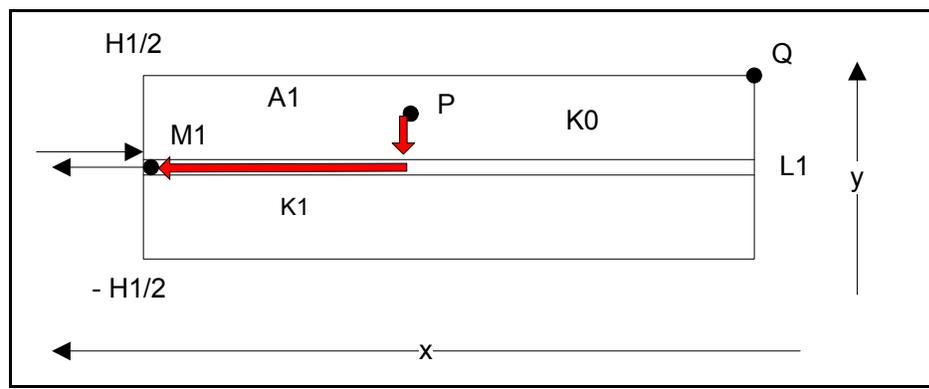


Figure 1.12 Représentation graphique du niveau élémentaire.
Adaptée de Bejan, Badescu et De Vos (2000, p. 1432)

Le coût de transport d'une unité de P vers M_1 est $K_0 y + K_1 x$. Le coût pour transporter tous les biens de A_1 vers M_1 est (Bejan, Badescu et De Vos, 2000):

$$C1 = 2\gamma \int_0^{H1/2} \int_0^{L1} (K_0 y + K_1 x) dx dy \quad (1.2)$$

Un certain nombre n_2 de surfaces élémentaires est rassemblé pour former le deuxième niveau (Figure 1.13) dont le flux est $m_2 = \gamma A_2$, avec $A_2 = n_2 A_1 = H_2 L_2$, $L_2 = (n_2/2) H_1$ et $H_2 = 2L_1$, en ayant le coût unitaire $K_2 < K_1$ le long de l'axe des x sur $y=0$.

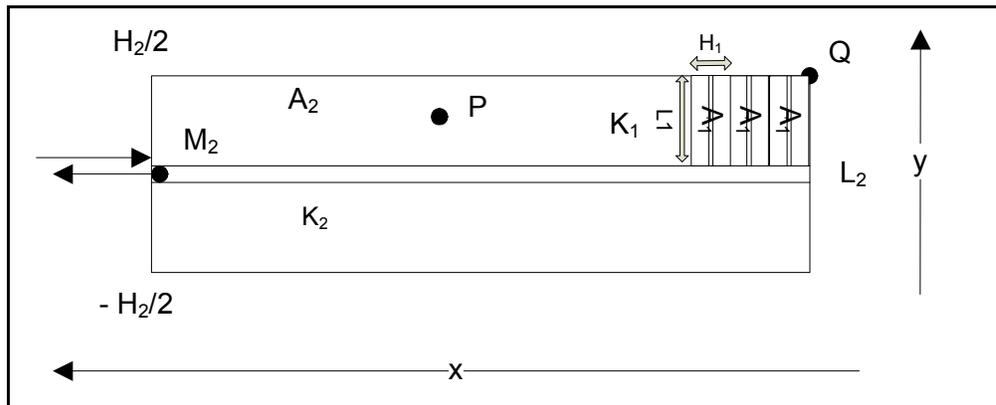


Figure 1.13 Représentation graphique du deuxième niveau.
Adaptée de Bejan, Badescu et De Vos (2000, p. 1434)

La même démarche est répétée à chaque niveau supérieur, jusqu'à l'atteinte du niveau représentant la technologie de transport la moins coûteuse. Le Tableau 1.4 indique les valeurs de $n_{i \text{ opt}}$, $(H_i/L_i)_{\text{opt}}$ et $C_{i \text{ min}}/m_i$ selon la minimisation des coûts d'après la loi Constructale.

Tableau 1.4 Le résultat de la minimisation des coûts selon la théorie constructale.
Adaptée de Bejan, Badescu et De Vos (2000, p. 1436)

i	$n_{i \text{ opt}}$	$(H_i/L_i)_{\text{opt}}$	$C_{i \text{ min}}/m_i$
1	-	$2K_1/K_0$	$(A_1K_0K_1/2)^{1/2}$
2	$2K_0/K_2$	K_2/K_1	$(A_2K_1K_2)^{1/2}$
≥ 3	$4K_{i-2}/K_i$	K_i/K_{i-1}	$(A_iK_{i-1}K_i)^{1/2}$

La qualité déterministe de la TC, ainsi que son application dans plusieurs domaines scientifiques ont fait de cette dernière, la base de la méthodologie dans cette recherche. En fait, la TC qui, à la base traite de l'optimisation du flux de chaleur, a été étendue pour étudier l'optimisation de la géométrie des réseaux routiers (Heitor Reis, 2008), l'illustration des dynamiques sociales (Bejan et Merckx, 2007) et enfin, la hiérarchie dans le domaine des transports (Bejan, Badescu et De Vos, 2000; Lorente et Bejan, 2010). Cette vaste application supporte l'hypothèse stipulant que la Constructale est une loi globale et déterministe régissant la formation des structures dans la nature (Bejan et Lorente, 2011).

Le chapitre 2 présente la méthodologie permettant de définir dans un premier temps les conditions d'application de la théorie constructale à la modélisation de la collecte des MR. Dans une deuxième temps, le chapitre présente les principes appliqués à l'évaluation de la performance de l'application de la théorie constructale comparativement à une collecte conventionnelle.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre traite de la méthode suivie pour appliquer la théorie constructale (TC) dans le cas de la collecte des MR. L'approche développée vise à construire deux modèles mathématiques, le premier utilise les variables de la collecte conventionnelle, et le deuxième applique la théorie constructale.

2.1 Modèle mathématique

Selon Bejan, Badescu et De Vos (2000), l'application de la théorie constructale dans le domaine de collecte (ou distribution) de biens (ou personnes) d'une surface vers un point (ou vice versa) se réalise suivant un des deux objectifs suivants : 1) La minimisation des coûts ou 2) La maximisation des profits. Dans la présente étude, les modèles développés sont définis vers une optique de coût global minimal.

Les équations utilisées dans le modèle sont basées sur l'équation de la constructale (1.2) de Bejan, Badescu et De Vos (2000).

$$C1 = 2\gamma \int_0^{H1/2} \int_0^{L1} (K0y + K1x) dx dy \quad (1.2)$$

2.2 Flux du système

Le modèle développé est constitué de flux de matières et d'énergie. Dans une collecte Constructale, les MR forment le flux de matières traversant le système des ménages au centre de transbordement, en passant par les points de décharge. En effet, les collecteurs ramassent les sacs poubelles déposés à chaque arrêt pour ensuite les poser dans le véhicule de collecte. Le véhicule continue sa tournée **de collecte** en effectuant des arrêts fréquents devant chaque

ménage (ou bâtiment) jusqu'à ce qu'il soit rempli. Dès qu'il est rempli, afin de minimiser ou éliminer les distances parcourues, il se décharge dans un véhicule **de transport** représentant le deuxième niveau et continue par la suite son chemin de collecte. Le véhicule du deuxième niveau fait à son tour un voyage avec quelques arrêts afin de collecter la charge des véhicules du premier niveau. Une fois plein, le véhicule du deuxième niveau transporte sa charge vers le centre de transbordement, et retourne à la zone de collecte pour recommencer un nouveau cycle de transport.

Le coût dans un système de collecte représente la résistance de ce système. Comme dans plusieurs flux naturels, pour une performance optimale, le flux de déchets tentera de parcourir le chemin ayant la plus faible résistance.

Le système considéré se définit par la collecte des ménages jusqu'au centre de transfert. Dans une perspective de minimisation des coûts globaux d'un système, le premier niveau, nommé également la surface élémentaire, sera dans cette étude un quartier traversé par une **seule** rue. La surface est limitée par des logements à droite et à gauche, et par une rue plus large au nord et une autre au sud. La largeur de cette surface est fixée à 72 mètres, selon les mesures d'un quartier résidentiel type de Montréal (Figure 2.1). La longueur optimale de cette surface sera déterminée par le modèle développé à partir de la théorie constructale.

Dans la plupart des grandes villes, la collecte des ordures se fait en moyenne tous les deux jours. Le modèle mathématique considère une génération de déchets à chaque intervalle de temps t . L'intervalle affectera donc la quantité de matières générées par personne et récupérées sur un territoire. Par conséquent, un changement de fréquence de collecte implique un changement de quantité collectée. C'est pour cela, que le modèle considère la variable de temps comme étant liée à la fréquence de collecte.



Figure 2.1 La surface élémentaire choisie à l'aide de Google Earth

Plusieurs facteurs affectent le choix de la capacité du véhicule. La densité de la population de la zone desservie a un effet sur la distance entre les arrêts, le nombre d'arrêts et la quantité ramassée par arrêt. Quant à la surface de la zone de collecte, elle influence la distance que le camion doit parcourir afin d'atteindre sa capacité maximale. En outre, La distance entre la zone et le centre de transbordement affecte la capacité du véhicule du deuxième niveau, qui doit minimiser ses voyages vers les centres de transbordement. De plus, le nombre de travailleurs influence la vitesse avec laquelle se fait la collecte sur chaque arrêt ainsi que le coût de la collecte par heure. Par ailleurs, la largeur des rues représente une contrainte potentielle pour le passage de grands véhicules. Enfin, la capacité du véhicule du deuxième niveau dépend du nombre et de la capacité de ceux du premier niveau, puisque le nombre d'arrêts au deuxième niveau est déterminé par la capacité et le nombre de véhicules du premier.

2.2.1 Limites du modèle

Puisque le modèle est général, plusieurs facteurs sont simplifiés en regard de la nature des informations disponibles. La capacité des camions varie entre 1 tonne et 20 tonnes. Le choix de ces limites de capacités est dû à la nature des chemins de collecte. En fait, un camion de collecte ayant une capacité supérieure à 20 tonnes n'est généralement pas autorisé à circuler

dans les zones résidentielles. Par ailleurs, un camion à capacité inférieure de 1 tonne s'avère inefficace dû à la vitesse avec laquelle ce camion sera rempli. Le modèle suppose que les camions de transport ne traversent qu'une seule fois la rue vers le centre de transbordement. En outre, le modèle développé considère un seul passage par rue par jour. Dans la mesure où l'approche développée, ne vise pas une optimisation du routage ou du positionnement des véhicules dans le réseau, mais plutôt une optimisation du flux de matières dans le système, le modèle ne tient pas compte :

- de la distance parcourue entre la zone collectée et les garages des véhicules;
- des arrêts causés par le trafic, les feux de circulation ou les panneaux d'arrêts.

Dans ce contexte, les coûts de l'infrastructure, des véhicules ainsi que de la maintenance sont omis du système.

2.3 Scénarios

Afin de déterminer l'efficacité du modèle, une comparaison entre un scénario de collecte conventionnelle et un scénario de collecte Constructale est établie. Dans les deux cas, une minimisation des coûts est visée, et par la suite la capacité optimale d'un véhicule de collecte est déduite. Ultérieurement, le modèle est appliqué pour simuler une densité variable.

2.3.1 Scénario de collecte conventionnelle

Dans un scénario de collecte conventionnelle, un camion effectue une collecte de type « bord de rue » des ordures ménagères produites dans une zone résidentielle. Cette zone se caractérise par un débit constant de MR dans chacun des ménages. Le camion traverse la zone en effectuant des arrêts fréquents sur chaque point de collecte. Ces arrêts sont séparés par une distance constante. Une fois rempli, le même camion fait un voyage vers le centre de transbordement afin d'effectuer une rupture de charge.

2.3.2 Scénario de collecte selon la loi Constructale

Dans un scénario de collecte suivant la Loi Constructale, un camion parcourt la zone résidentielle et, similairement à la collecte conventionnelle, il collecte les ordures ménagères déposées au bord de la rue. Une fois rempli, le camion se décharge dans un autre camion dédié au transport ayant une capacité supérieure. Par la suite, le camion de collecte continue à collecter le reste du territoire, et le processus est répété. En outre, le véhicule à grande capacité (camion ou train) reçoit les charges de plusieurs camions de collecte, et voyage par la suite vers le centre de transbordement. Conséquemment, le territoire de collecte est divisé en deux niveaux : le premier niveau, ou niveau élémentaire, dont le véhicule utilisé est le véhicule de collecte et le deuxième niveau, dans lequel un véhicule à grande capacité voyage vers le centre de transbordement.

Afin de déterminer la consommation de carburant en fonction de la capacité d'un véhicule, les graphes des figures : Figure 2.2 Figure 2.3 Figure 2.4 sont utilisés. Il est à noter que la littérature n'offre pas d'études détaillées sur la consommation des camions par rapport à leur capacité, ceci est dû aux différents facteurs qui affectent la consommation de carburant, notamment la marque du véhicule, la nature du terrain, le nombre d'arrêts etc. Pour cela, l'équation logarithmique de l'allure de la courbe développée à l'aide d'Excel est utilisée dans cette étude. La forme logarithmique a été inspirée de Lorente et Bejan (2010), qui ont décrit la courbe d'efficacité d'un moteur en fonction de sa masse comme étant logarithmique.

Le graphe de la Figure 2.2 est utilisé pour déterminer la consommation par heure en état ralenti selon la capacité du véhicule.

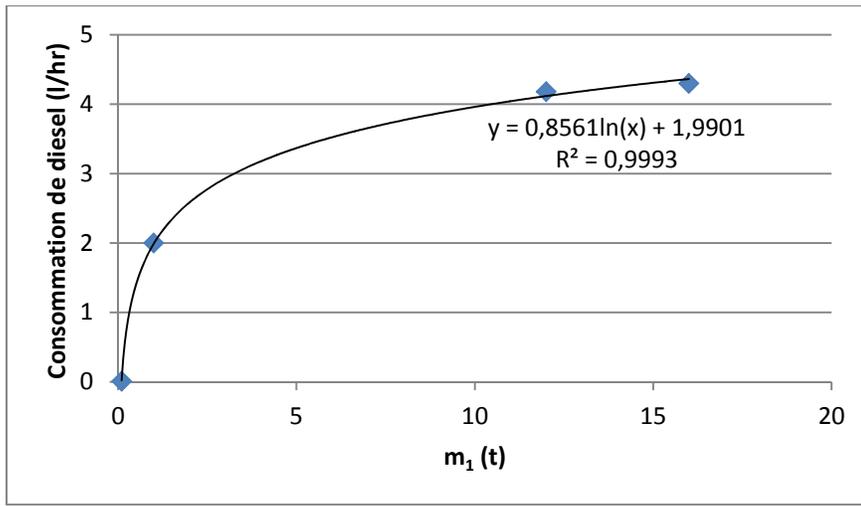


Figure 2.2 La consommation d'un camion en mode ralenti en fonction de sa capacité.
Adaptée de Gaines, Vyas et Anderson (2006, p. 10)

Pour calculer la consommation en mode de collecte (entre deux points de collecte), le graphe de la Figure 2.3 est utilisé.

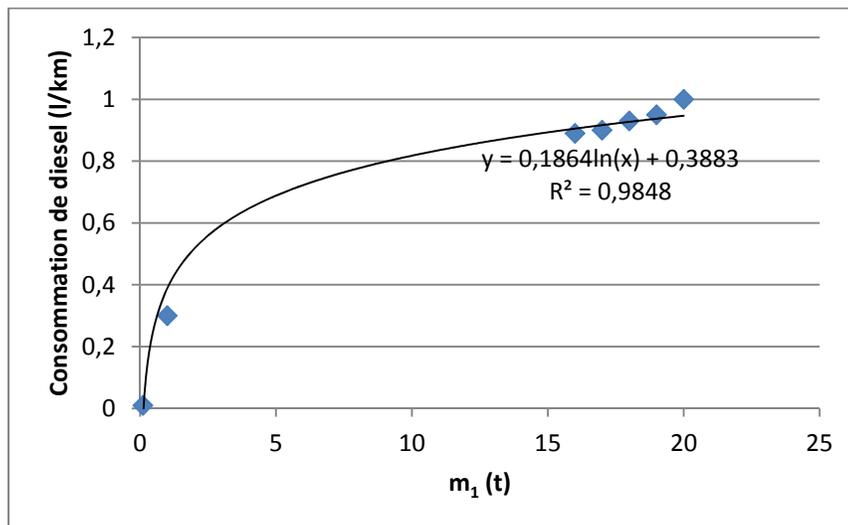


Figure 2.3 La consommation d'un camion en mode de collecte en fonction de sa capacité.
Adaptée de Delorme, Karbowski et Sharer (2009, p. 19).

Pour calculer la consommation en mode de transport (camion est plein), le graphe de la Figure 2.4 est utilisé.

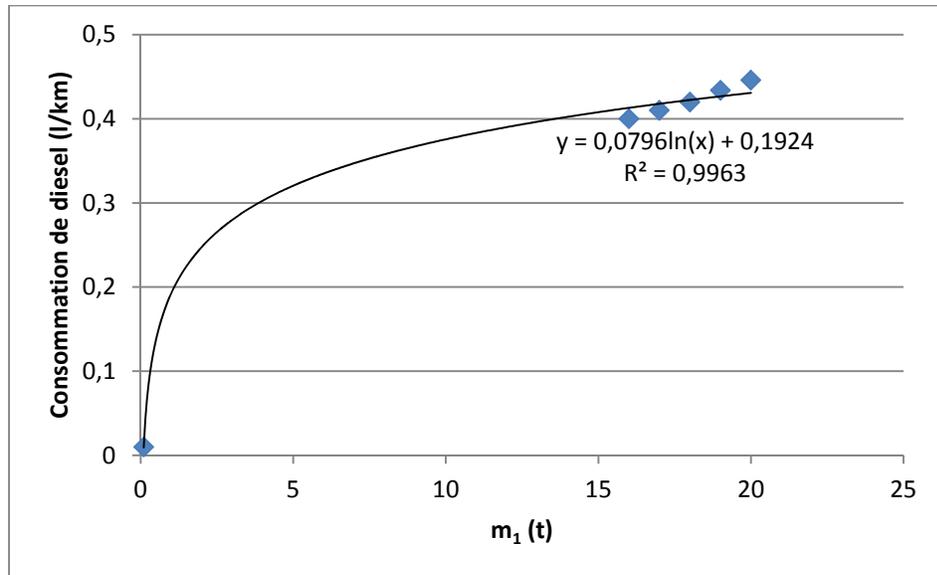


Figure 2.4 La consommation d'un camion en mode de transport en fonction de sa capacité.

Adaptée de Delorme, Karbowski et Sharer (2009, p. 21)

L'application de la théorie constructale repose sur la définition d'un certain nombre de paramètres. Ceux-ci sont déterminés sur la base de l'information disponible dans la littérature et sont présentés dans le Tableau 2.1.

Tableau 2.1 Paramètres utilisés dans le modèle

Paramètre	Description	Unité	Valeur scénario conventionnel	Valeur scénario Constructal
H ₂	largeur d'une rue à collecter	km	0,072	0,072
N _e	nombre de travailleurs ⁹	-	3	3
S _c	salaire du chauffeur	\$/h	35	35
S _r	salaire d'un ramasseur	\$/h	35	35
v _c	vitesse moyenne en zone de collecte	km/h	15	15
v _t	vitesse moyenne durant le transport	km/h	50	50
d ₀	distance parcourue au niveau 0	km	0,02	0,02
P	densité de la population du territoire ⁹	hab/km ²	4323	4323
A	surface du territoire	km ²	1	1
Ψ	quantité de matières générées par personne par jour ⁹	t/hab/jour	0,0025	0,0025
hab _l	habitants par logement ⁹	hab	1,6	1,6
l _e	logements par entrée	-	3	3
e _a	entrées par arrêt	-	2	2
c _s	fréquence de collecte par semaine ⁹	-	2	2
n _i	niveaux hiérarchiques de collecte	-	1	2
f _c	coût du carburant	\$/l	1,35	1,35

⁹ Donnée de la ville de Montréal

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

La première partie des résultats compare un scénario de collecte conventionnelle à un scénario de la collecte Constructale. Cette partie traite de l'optimisation de la collecte sur le territoire selon la loi Constructale afin de déterminer le scénario le plus économiquement rentable. Par la suite, la capacité optimale des véhicules de collectes sera déterminée en fonction d'une variation de la densité de la population.

3.1 Définition du système à l'étude et des flux associés

Plusieurs acteurs interagissent dans le système étudié. Ces acteurs sont séparés par deux phases distinguées : la phase de collecte et la phase de transport.

3.1.1 Définition du système

Les résultats de la simulation du modèle sont fonction de plusieurs variables. Ces variables sont divisées en trois catégories (Figure 3.1) :

- les flux de matières résiduelles (MR) : quantité de MR transportée dans chaque niveau du processus par unité de temps (jour);
- les flux de coûts : variables affectant directement la génération du coût par unité de temps (jour), telles que les salaires des travailleurs et le coût du carburant;
- les paramètres : variables affectant indirectement la génération des coûts ainsi que la quantité de MR transportées, la densité et la surface du territoire collecté etc.

La Figure 3.1 représente les différents facteurs affectant le cheminement des matières résiduelles des ménages au centre de transbordement. Cette représentation montre trois phases de transport distincts : le collecte des ménages, le transport vers le point de décharge et le transport vers le centre de transbordement. Dans les deux premières phases, le véhicule

utilisé est le camion de collecte tandis que dans la troisième, le camion de transport est utilisé.

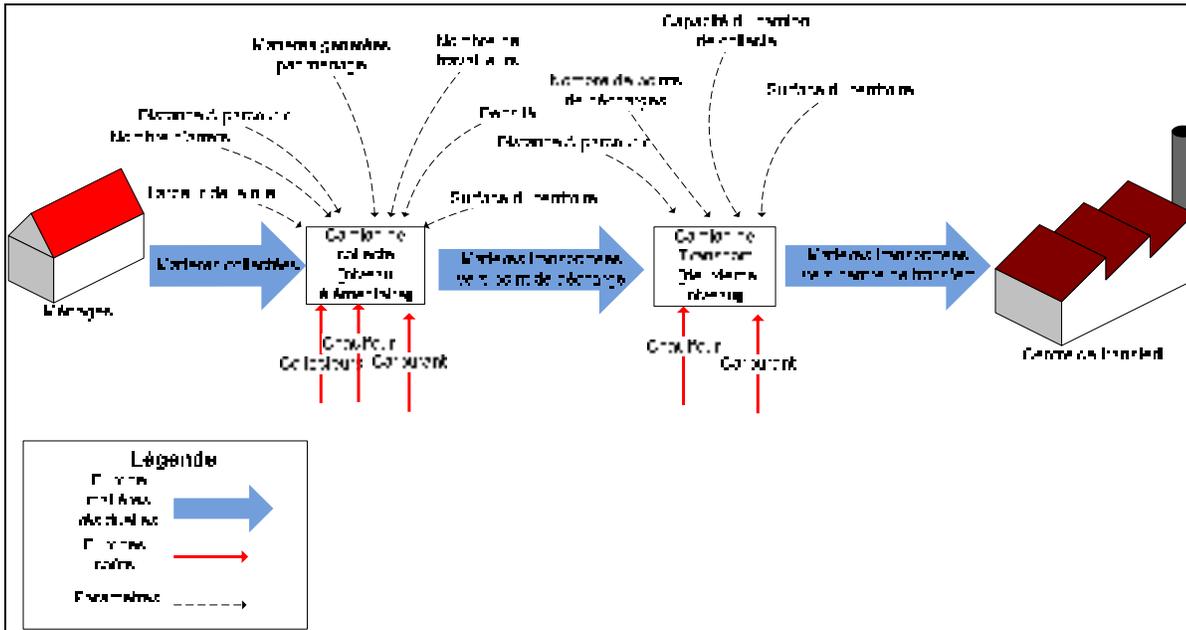


Figure 3.1 Représentation des flux dans le modèle

Dans la Figure 3.1 la capacité du camion de collecte (Phases 1 et 2) dépend du nombre d’arrêts effectués et de la quantité de matières collectées à chaque arrêt. Tandis que la capacité du camion de transport (phase 3) dépend du nombre de points de décharges ainsi de la capacité des camions de collectes. Dans le scénario conventionnel, le même véhicule est utilisé dans les 3 phases. Les matières sont transportées des ménages au centre de transbordement sans passer par des points de décharge. Tandis que le scénario constructal distingue les 3 phases en assignant un camion de collecte au deux premières et un camion de transport à la troisième.

3.1.2 Données de base

Afin de servir comme données de base pour le modèle développé, quelques paramètres ont été fixés en fonction des trois phases du modèle : la collecte, le transport vers le point de décharge et le transport vers le centre de transbordement.

3.1.2.1 Données de base pour les phases de collecte et de transport vers un point de décharge

Au niveau d'un arrêt, le modèle considère que chacun des 2 collecteurs peut transporter 60 kilogrammes de matières dans un aller-retour en 17 secondes (Masters et Ela, 1991). La distance parcourue dans un aller-retour est fixée à 20 mètres. Le temps d'attente par arrêt dépend de la distance parcourue par les collecteurs, plus cette distance est grande, plus le temps d'attente augmente, compte tenu que les collecteurs ramassent les matières à vitesse constante. Cette distance varie en fonction de la largeur de la rue collectée. En fait, plus la rue est large, plus la distance que les collecteurs traversent est grande afin de pouvoir ramasser les matières déposées sur les deux bords de la rue. La largeur de toutes les rues collectées est fixée à 72 mètres (maisons incluses). Le coût du carburant est fixé à 1.35\$ par litre. Cette valeur a été inspirée des coûts actuels d'essence au Canada (en date de rédaction du mémoire). D'un autre côté, les salaires des travailleurs sont fixés à 35\$ de l'heure, un changement de ces taux pourrait avoir un impact considérable au coût total du système, puisque le coût de la main d'œuvre en forme une grande partie. Dans le modèle développé, les salaires à l'heure des travailleurs sont fixes, puisqu'un changement dans ces derniers aura le même impact dans tous les scénarios. Enfin, la consommation de carburant en mode ralenti est dépendante de la capacité du véhicule de collecte, les valeurs du graphe de la Figure 2.2 ont été utilisées dans le modèle.

Au niveau du transport inter-arrêts, ainsi que le transport vers un point de décharge, le modèle considère que la vitesse moyenne est de 15 km/h. En réalité, cette faible vitesse est due aux phases d'accélération et de décélération fréquentes, ainsi qu'au trafic dans la zone de collecte. D'un autre côté, puisque le camion ne sera rempli qu'à la fin de son parcours (au

point de décharge dans le cas d'une collecte constructale) sa charge est considérée en tout temps comme étant la moitié de sa capacité durant son parcours. La consommation de carburant dans la phase de collecte est dépendante de la capacité du véhicule de collecte, les valeurs du graphe de la Figure 2.3 sont utilisées dans le modèle.

3.1.2.2 Données de base pour la phase de transport

Dans la phase de transport, la vitesse moyenne est fixée à 50 km/h puisqu'en absence d'arrêts fréquents, le camion de transport voyage avec une vitesse relativement plus grande que la vitesse dans la zone de collecte. Dans le cas d'une collecte constructale, puisque le camion de transport s'arrête à chaque point de décharge pour collecter les matières déposées par les camions de collecte, ce dernier ne sera rempli qu'après avoir collecté plusieurs points de décharge. Par conséquent, sa charge est considérée comme étant la moitié de sa capacité. Par ailleurs, la charge du camion dans une collecte conventionnelle sera la totalité de sa capacité, puisque ce dernier ne se dirige vers le centre de transbordement que quand il sera rempli. Enfin, la consommation de carburant dans la phase de transport est dépendante de la capacité du véhicule, les valeurs du graphe de la Figure 2.4 sont utilisées dans le modèle.

Le Tableau 3.1 ci-dessous résume les différentes données de bases utilisées dans les 3 phases du processus d'acheminement des matières résiduelles vers le centre de transbordement.

Tableau 3.1 Paramètres de bases dans les phases de collecte et transport

Paramètre	Description	Unité	Valeur
H_2	largeur d'une rue à collecter	km	0,072
N_e	nombre de travailleurs	-	3
S_c	salaire du chauffeur	\$/h	35
S_r	salaire d'un ramasseur	\$/h	35
v_c	vitesse moyenne en zone de collecte	km/h	15
v_t	vitesse moyenne durant le transport	km/h	50
d_0	distance parcourue par arrêt	km	0,02
f_c	coût du carburant	\$/l	1,35
t	temps d'attente par arrêt	s	17

3.1.3 Spécificités territoriales des scénarios de collecte

Le territoire étudié a une surface de 1 km^2 avec la même densité que celle de la ville de Montréal : 4323 hab/km^2 . Ces habitants sont répartis sur des logements de même taille tout au long du territoire. À chaque arrêt, le camion collecte les MR de 2 bâtiments dont chacun comporte 3 logements. La densité par habitation est fixée à 1,6 habitants par logement. Chacun de ces habitants génère 2,5 kilogrammes de MR par jour. Ces données ont été recueillies de la ville de Montréal. Le Tableau 3.2 résume les différentes valeurs utilisées comme caractéristiques territoriales dans le modèle développé.

Tableau 3.2 les spécificités territoriales du modèle

Paramètre	Description	Unité	Valeur
P	densité de la population du territoire ¹⁰	hab/km ²	4323
A	surface du territoire	km ²	1
Ψ	quantité de matières générées par personne par jour ¹⁰	t/hab/jour	0,0025
hab _l	habitants par logement ¹⁰	hab	1,6
l _e	logements par entrée	-	3
e _a	entrées par arrêt	-	2
c _s	fréquence de collecte par semaine ¹⁰	-	2

3.2 Transférabilité de la théorie constructale à la collecte des matières résiduelles

D'après Bejan, Badescu et De Vos (2000), le coût total minimal du système sera une combinaison optimale des coûts des flux dans chaque niveau $K_0, K_1, K_2 \dots K_i$. Ces coûts sont organisés du plus grand K_0 associé au transport le plus cher au plus petit K_i associé au transport le moins cher. Dans cette étude, 3 niveaux hiérarchiques sont choisis, ces niveaux sont associés aux différents modes de transports des matières :

- la marche : les collecteurs qui ramassent les matières du bord de la rue;
- le camion de collecte : le camion qui parcourt la zone de collecte pour enfin déposer sa charge dans un point de décharge;
- le camion de transport : le camion qui ramasse les matières des points de décharge pour les acheminer vers un centre de transbordement.

¹⁰ Donnée de la ville de Montréal

Cette étude considère 3 coûts associés à chacun des modes de transports : K_0 , K_1 et K_2 avec K_0 étant le coût unitaire le plus cher et K_2 étant le coût unitaire le moins cher. En fait, K_0 représente le coût généré par les collecteurs afin de transporter 1 tonne et traverser 1 kilomètre. Puisque le collecteur, a la vitesse la plus faible parmi les autres moyens de transports (camions) et puisque sa capacité (60 kg) est également la plus faible comparée à celle des camions, le collecteur prend le plus de temps à transporter 1 tonne et traverser 1 kilomètre. Étant donné que le collecteur coûte 35\$ par heure au système, il s'avère être le moyen de transport le plus cher par tonne.km. K_1 sera associé alors au camion de collecte, qui, avec sa vitesse moyenne faible et sa capacité inférieure à celle du camion de transport vient se positionner au deuxième rang dans la hiérarchie des moyens de transports utilisés. Enfin, le camion de transport, ayant la vitesse et la capacité la plus élevée du système se place au troisième rang dans la hiérarchie. Cette hiérarchie découle également du principe d'économie d'échelle. En fait, plus les biens sont transportés en quantités (camion de transport), sans effectuer des grandes distances avec arrêts fréquents, plus le coût total du transport diminue.

D'après Bejan, Badescu et De Vos (2000), les coûts unitaires des flux (K_0 , K_1 , K_i), sont exprimés en \$/m par unité de biens par unité de temps. Or, dans le cas de cette étude, l'unité utilisée pour les K_i sera le \$/km par tonne par jour, Cela étant en raison de l'ordre de grandeur des distances parcourues et des quantités de matières transportées. Or, puisque les scénarios sont comparés pour une journée de génération de MR, l'unité de temps est omise, d'où la sélection du coût par tonne par kilomètre comme unité de mesure des coûts unitaires. Le but du modèle sera alors de combiner les coûts dans chaque niveau de collecte afin de générer un coût total minimal. Pour atteindre cet objectif, les coûts par tonne par kilomètre sont multipliés par la distance (en km) et la masse de MR collectée (en tonnes) dans chaque niveau. Ainsi, la somme des coûts de chaque niveau détermine le coût total du système.

Le Tableau 3.3 compare les unités de la constructale de Bejan et les unités utilisées dans la présente étude.

Tableau 3.3 Comparaison entre les unités utilisées dans cette étude et les unités de la constructale

Variable	Symbole	Unité d'après Bejan, Badescu et De Vos (2000)	Unité utilisée dans cette étude
Coût unitaire du transport	K_i	\$/m.unité.s	\$/km.tonne
quantité transportée jusqu'à la fin d'un parcours ¹¹	m_i	unité.s	tonne
Superficie du territoire	A_i	m ²	km ²
Coûts totaux du système	C_i	\$/s	\$

3.2.1 Calcul de K_0

K_0 représente le coût de la collecte par arrêt. Durant un arrêt et pendant que le camion est en état ralenti, deux collecteurs traversent une distance (aller-retour) et transportent les sacs ou bacs de la rue vers le camion. Pour calculer le coût de ce processus l'équation (3.1) est utilisée.

$$K_0 = \frac{t(2s_r + s_c + \alpha f)}{Q_0 d_0} \quad (3.1)$$

Où :

K_0 (\$/tonne.km) = le coût par tonne.km de la collecte sur un arrêt;

t (h) = le temps requis pour collecter les déchets sur un arrêt;

s_r (\$/h) = le salaire par collecteur par heure;

s_c (\$/h) = le salaire du chauffeur par heure;

¹¹ Équivalente à la capacité du moyen de transport dans cette étude

α (l/h) = le coût de la consommation du véhicule par heure;

f (\$/l) = le coût d'un litre de diesel;

$Q_0(t)$ = la charge en tonne que les collecteurs transportent par arrêt;

d_0 (km) = la distance parcourue par les collecteurs par arrêt (aller-retour).

3.2.2 Calcul de K_1

Pour trouver le coût par tonne.km au niveau élémentaire, l'équation (3.2) est utilisée :

$$K_1 = \frac{\beta f + \frac{2s_r + s_c}{v}}{Q_1} \quad (3.2)$$

Où :

β (l) = la consommation d'un camion en litres pour parcourir un kilomètre;

f (\$/l) = le coût d'un litre de diesel;

s (\$/h) = le salaire des travailleur par heure;

v (km/h) = la vitesse moyenne en km/h. Elle est calculée en comptant les kilomètres que le camion parcourt en une heure;

$Q_1(t)$ = la charge moyenne du camion durant le parcours (considérée la moitié de sa charge maximale pour des raisons de simplification).

3.2.3 Calcul de K_2

Le calcul de K_2 est similaire à celui de K_1 , la seule différence étant la vitesse moyenne dans le cas du scénario conventionnel, et la capacité ainsi que la vitesse moyenne dans le cas du scénario Constructal. En général, la vitesse moyenne en phase de transport est plus élevée qu'en phase de collecte, ceci est dû à la faible fréquence d'arrêts dans cette phase. Par ailleurs, dans le scénario conventionnel le même camion performe la collecte et le transport des MR vers le centre de transbordement. Or dans le scénario Constructal, un camion de capacité plus élevée est utilisé, d'où la variation de la capacité moyenne entre la phase de collecte et de transport dans ce scénario.

3.2.4 Valeurs préliminaires de K_0 , K_1 et K_2

Dans un premier temps, les valeurs de K_0 , K_1 et K_2 sont calculées par rapport à des capacités fixes des moyens de transport. Par la suite, les tendances des K_i sont observées par rapport à une variation de la capacité du véhicule de collecte.

Le choix de la capacité d'un collecteur a été fixé à 60 kg tel que discuté dans les sections précédentes. La capacité préliminaire du véhicule de collecte quant à elle, est fixée à 1 tonne. Cette valeur est inspirée des véhicules de collecte à faible capacité déjà déployés dans les zones piétonnes dans plusieurs villes autour du monde (Figure 1.9). La capacité du véhicule de transport est fixée à 7 tonnes, la même capacité que le véhicule de collecte utilisé de nos jours à Montréal (Tableau 3.4).

Tableau 3.4 Capacités des véhicules de collecte et de transport

i	Capacité (tonnes)	valeur de K_i (\$/tonne.km)
0	0,06	155,96
1	1	7,69
2	7	0,37

3.2.5 Variation des K_i en fonction de la capacité du camion de collecte

La Figure 3.2 décrit la variation de K_0 , K_1 et K_2 en fonction de la capacité du véhicule m_1 . La variation de K_0 est principalement due à la consommation de carburant lors d'un arrêt. Un camion à grand moteur consomme plus de carburant qu'un camion à petit moteur en mode ralenti (Figure 2.2). La variation de K_1 et K_2 est affectée principalement par la capacité et la consommation de carburant du véhicule. En fait, plus la capacité du camion augmente, plus il est rentable en termes de coûts par tonnes par km à vitesse constante puisqu'il transporte plus de matières sur la même distance.

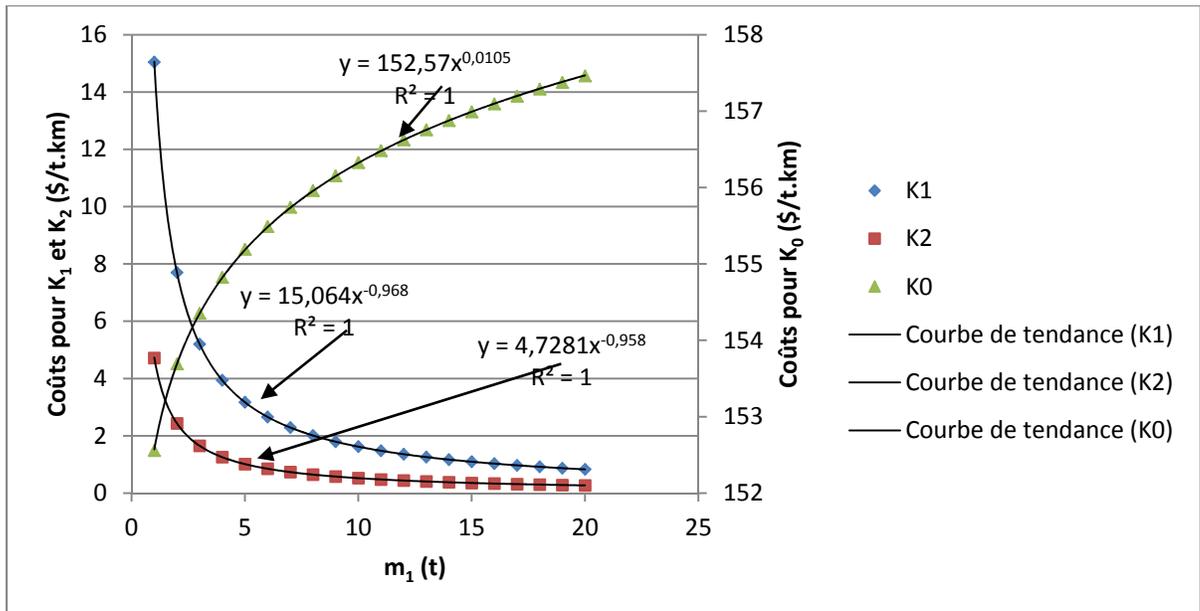


Figure 3.2 K_0 , K_1 et K_2 en fonction de m_1

À noter que ces valeurs n'incluent pas la consommation de carburant durant les phases d'accélération et de décélération dû au manque de données dans la littérature. Ces données auraient pu augmenter la valeur de K_1 , puisque le camion de collecte effectue des arrêts fréquents et la phase d'accélération consomme une quantité considérable de carburant par rapport à la distance parcourue.

3.3 Collecte suivant la loi Constructale

Selon la TC de Bejan, Badescu et De Vos (2000), l'optimisation du transport d'un flux est obtenue en minimisant les résistances que ce flux rencontre dans son parcours.

Or la théorie de Bejan a traité les flux provenant d'une surface (infinité de point) vers un point, tandis que dans le cas d'une collecte des MR, les matières sont transportées d'une multitude de points (arrêts) vers un point (centre de transbordement).

D'où la nécessité de l'adaptation de l'équation (3.3) de Bejan qui utilise les intégrales pour calculer un coût total en considérant que les matières sont générées dans chaque point du

territoire. Ce qui n'est pas le cas dans la collecte des MR puisque le système considère que les matières sont générées aux arrêts de collecte.

$$C1 = 2\gamma \int_0^{H1/2} \int_0^{L1} (K0y + K1x) dx dy \quad (3.3)$$

Dans l'équation (3.3), K_0 est multiplié par y qui est la distance parcourue au niveau 0. K_1 , est multiplié par x qui est la distance parcourue au niveau 1. L'intégrale double de $K_0y + K_1x$ tout au long de la surface du territoire (H_1L_1) représente le coût total pour transporter **une** unité par km^2 d'un point $(P(x,y))$ de la surface vers un point $M(0,0)$ à l'extrémité du territoire. Ce coût multiplié par la quantité de biens γ générée par km^2 forme le coût total du transport sur le territoire.

Dans la collecte des MR, puisque les matières ne sont pas générées dans chaque point du territoire mais uniquement à chaque arrêt de collecte, γ est remplacée par la quantité de matières générées par logement, et l'intégrale double est remplacée par une somme des coûts dans les 3 phases du système.

Le Tableau 3.5 résume les variables de la constructale adapté à la collecte des MR.

Tableau 3.5 Comparaison entre les variables de l'équation de Bejan et celles utilisées dans cette étude

Variable dans la constructale de Bejan	Variable dans la collecte des MR
y	d_0
x	L_1
γ	ξ^{12}

¹² ξ étant la quantité générée par arrêt. $\xi = \text{hab}_i \cdot \Psi \cdot l_e \cdot e_a$. (Tableau 3.2)

Trois moyens de transport se présentent selon la TC :

- Les collecteurs qui transportent les sacs ou bacs du bord de la rue vers le camion (Figure 3.3);
- Les camions de petite taille chargés du processus de collecte (Figure 3.3);
- Les camions de grande taille chargés du processus de transport (Figure 3.3).

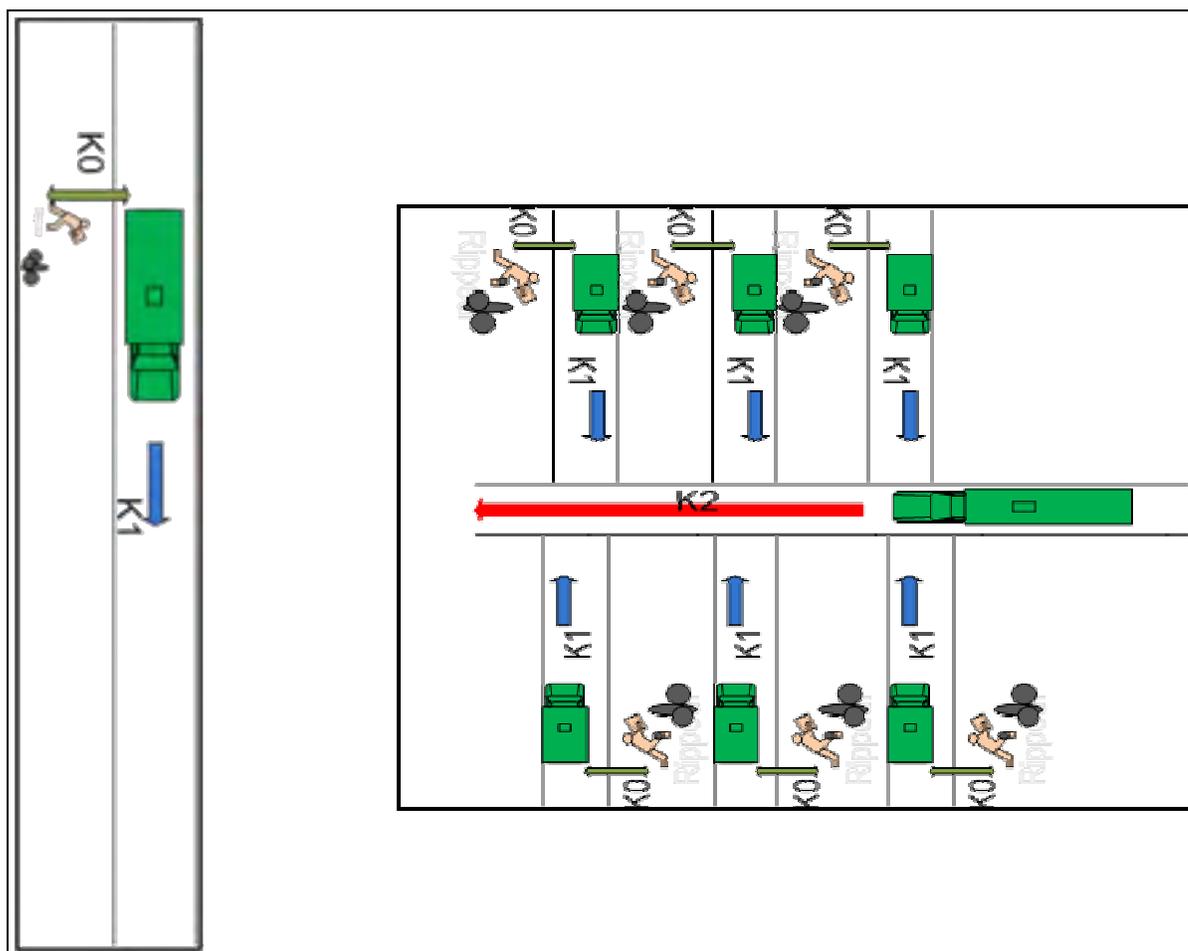


Figure 3.3 Représentation des niveaux 1 et 2 de la théorie constructale appliquée à la collecte des matières résiduelles

Les collecteurs, dont le coût par tonne.km K_0 est le plus cher dans le système représentent une partie du premier niveau de transport. Ensuite, le petit camion de collecte sera la deuxième partie de ce niveau avec son coût par tonne.km K_1 inférieur à K_0 . Par la suite, un

camion de capacité plus élevée dont le coût par tonne.km K_2 - inférieur à K_1 - représente le deuxième niveau du système.

Lest coûts dans le scénario constructal sont alors répartis en 3 parties :

- Coûts par arrêts :

$$2K_0Q_0H_0 \quad (3.4)$$

- Coûts de transport entre les arrêts dans la surface élémentaire :

$$\frac{1}{2}(2Q_0na_1)K_1na_1da_1 \quad (3.5)$$

- Coûts de transport vers le centre de transbordement :

$$\frac{1}{2}na_2 \times 2na_1Q_0K_2L_2 \quad (3.6)$$

Le coût total de la collecte sera alors :

$$C_{cons} = na_2na_1Q_0(6K_0H_0 + 2na_1da_1K_1 + na_2da_2K_2) \quad (3.7)$$

Le coût total généré par l'application de la constructale au territoire étudié est décrit dans le Tableau 3.6.

Tableau 3.6 coûts de l'application de la collecte constructale au territoire étudié

Densité (hab/km ²)	4000	4323	5000
Coût total (\$)	113,44	119,65	127,86

3.4 Collecte Conventiennelle

Le scénario Conventiennelle est constitué d'un seul niveau de collecte dans lequel la collecte et le transport vers le centre de transbordement sont effectués par un seul moyen de transport (un ou plusieurs camions de même capacité).

La collecte conventiennelle se caractérise par trois étapes distinctes :

- La collecte aux arrêts :

$$n_a \times 2K_0H_0Q_0 \quad (3.8)$$

- Le transport entre les arrêts :

$$\frac{1}{2} n_a \times 2Q_0K_1(n_a d_a) \quad (3.9)$$

- Le transport vers le centre de transbordement

$$2n_aQ_0K_2L_2 \quad (3.10)$$

Le coût total sera donc :

$$C_{conv} = n_aQ_0(2K_0H_0 + n_a d_a K_1 + 2K_2L_2) \quad (3.11)$$

Où :

n_a = nombre total d'arrêts;

Q_0 (t) = la quantité ramassée à chaque entrée;

K_0 (\$/t.km) = le coût par t.km généré par chaque arrêt;

H_0 (km) = la distance traversée par les collecteurs à chaque arrêt;

d_a (km) = la distance entre deux arrêts;

K_1 (\$/t.km) = le coût par t.km généré par le transport entre les arrêts;

K_2 (\$/t.km) = le coût par t.km généré par le transport vers le centre de transbordement;

L_2 (km) = la distance entre la zone de collecte et le centre de transbordement.

Le coût total généré par la collecte conventionnelle du territoire étudié est décrit dans le Tableau 3.7.

Tableau 3.7 coûts de la collecte conventionnelle du territoire étudié

Densité (hab/km ²)	4000	4323	5000
Coût total (\$)	121,42	134,24	145,52

3.4.1 Effet de la densité sur la collecte

Le modèle a été simulé à vingt reprises en faisant varier la densité de la population. Les résultats (Figure 3.4) montrent une légère économie de coûts en faveur du scénario conventionnel pour les densités variantes entre 500 et 4000 hab/km². Pour les densités supérieures à 4000 hab/km², le scénario Constructal s'avère le plus rentable. En fait, la variation des coûts dans le scénario conventionnel se dote d'une allure exponentielle, or celle du scénario Constructal se caractérise par un aspect linéaire.

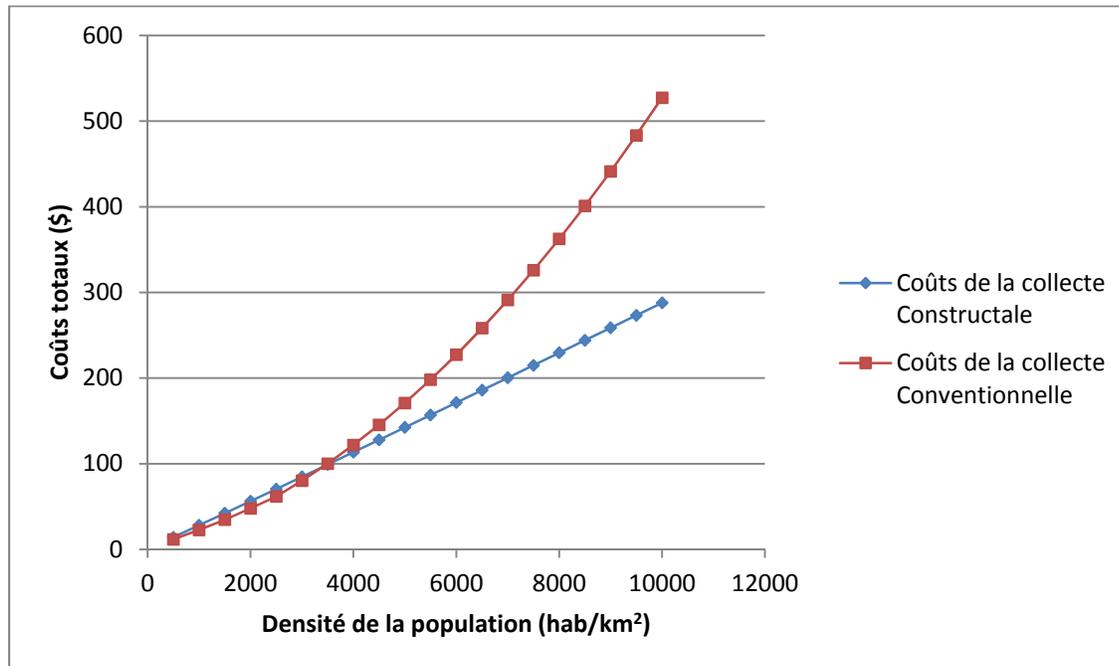


Figure 3.4 Coûts de la collecte des MR sujets à une variation de la densité de la population

En ce qui concerne la capacité des véhicules de collecte et de transport, les scénarios considèrent que les camions de collecte au deuxième niveau de la Constructale possèdent une capacité équivalente à ceux de la collecte conventionnelle. Ainsi, le scénario Constructale tente d'ajouter un sous niveau de collecte au scénario conventionnel dans un effort visant la minimisation des coûts totaux générés par le système.

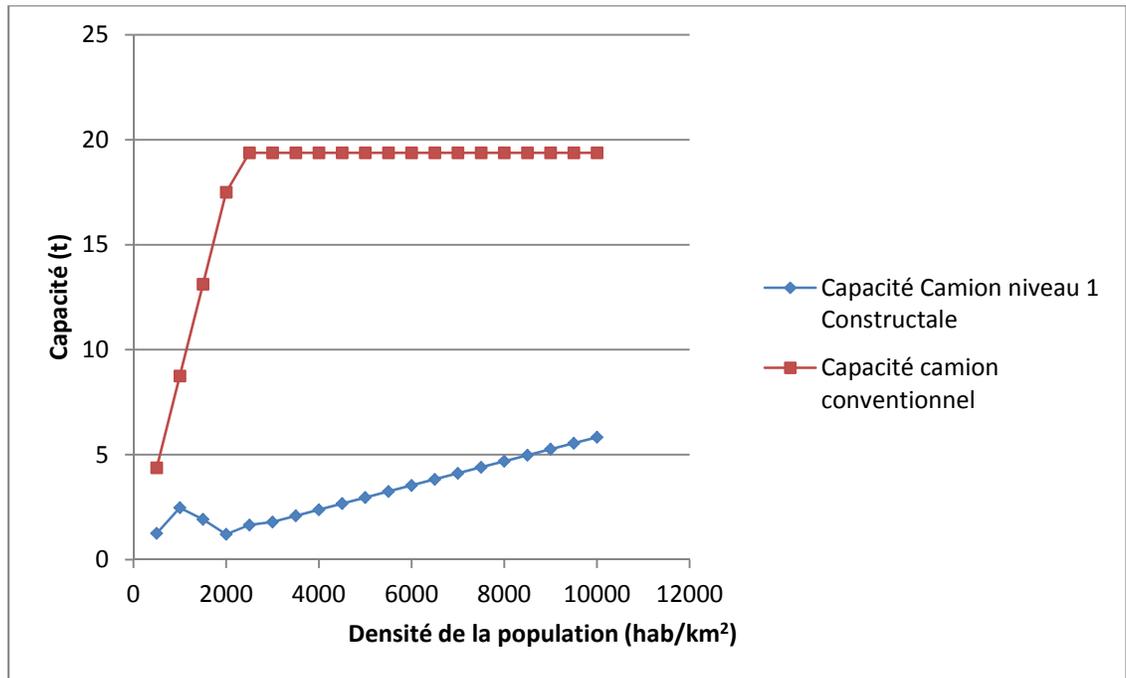


Figure 3.5 Capacités des camions dans les scénarios Constructal et conventionnel

La capacité des camions dans le premier niveau de la collecte Constructale varie entre 1 et 5,25 tonnes (Figure 3.5). Celle des camions de la collecte conventionnelle varie entre 4 et 19,36 tonnes, cette capacité est identique à celle des camions du deuxième niveau de la Constructale. D'après les graphes des Figure 3.4 et Figure 3.5, la collecte constructale permet à partir d'une certaine densité seuil de diminuer le coût total du système tout en permettant l'utilisation d'un camion à faible capacité par rapport au camion de collecte actuel. Ces résultats permettent non seulement d'éviter des coûts additionnels pour la collecte, mais de minimiser les risques de celles-ci sur la population et sur l'environnement.

3.5 Analyse des résultats

Les résultats de la simulation des modèles montrent que la théorie constructale n'optimise les flux qu'à partir d'une certaine densité du territoire (4000 hab/km²). Pour les densités inférieures à cette densité seuil, la collecte conventionnelle est préférée, cela est dû au fait qu'un seul véhicule peut transporter une grande portion des matières en une seule tournée, sans avoir à faire des allé retour. Quand la densité dépasse la densité seuil, la multitude des

arrêts fréquents fait en sorte qu'une grande partie de la perte d'énergie se situe au niveau de l'arrêt. D'où l'avantage de la division du territoire en plusieurs surfaces élémentaires collectées par des véhicules de faible capacité, puisque ces derniers consomment moins d'énergie aux arrêts. Outre cela, une grande fréquence d'arrêts sur une distance fixe fait en sorte que les véhicules atteignent rarement une vitesse stable. En d'autres termes, le trajet de collecte se constitue d'une multitude de phases d'accélérations et de décélérations consécutives. En phase d'accélération, la vitesse du moteur pourrait excéder 4000 tours/minute, éloignant ainsi l'efficacité de sa valeur optimale (Figure 1.8). La vitesse du moteur dépend aussi de la charge du véhicule. En fait, plus le camion est chargé, plus il a besoin d'énergie pour transporter sa charge. D'où l'intérêt d'utiliser des camions à faible volume.

CHAPITRE 4

DISCUSSION

La présente étude vise à introduire une nouvelle approche pour la collecte et le transport des MR. Cette approche se base sur la théorie constructale qui cherche à optimiser les flux de matières dans un système en minimisant les résistances que ces flux rencontrent. L'application de cette théorie dans le domaine de la gestion des MR permet une redéfinition de la hiérarchie qui régit la collecte et le transport.

4.1 Le modèle et son application

La problématique abordée dans la présente étude représente une partie du problème de la gestion des matières résiduelles. Cette partie - la collecte vers le centre de transbordement – n'est pas isolée du reste du système. Pour cela, le modèle développé n'est qu'un morceau d'une solution potentielle au problème de la gestion des MR.

Dans une application concrète du modèle développé et d'une manière générale, plusieurs facteurs affectent la consommation de carburant d'un camion :

- la marque et le modèle du moteur et des spécificités du camion (modèle, année);
- le type de pneus utilisés et leur alignement;
- la fréquence de la maintenance;
- la nature de la route, la signalisation et le trafic;
- l'agressivité de la conduite du chauffeur;
- la charge du camion;
- la fréquence des arrêts.

D'autre part, la génération des coûts ne se limite pas à la consommation de carburant, mais inclut plusieurs autres facteurs tels que :

- les salaires des travailleurs;

- les coûts de maintenance;
- les coûts des véhicules;
- la location des garages.

Le modèle Constructale suggère la division du territoire en plusieurs entités nommées surfaces élémentaires, chacune de celles-ci est collectée par un camion de faible capacité. Ces camions sont actuellement utilisés pour collecter les zones piétonnes dans plusieurs villes autour du monde. Ils sont également utilisés quand la rue collectée n'est pas suffisamment large pour qu'un grand camion puisse y accéder. Malgré leur efficacité pour répondre à ces contraintes territoriales, les camions à faible capacité restent moins avantageux que ceux à grande capacité. Cela pourrait être dû au grand nombre de travailleurs requis pour opérer plusieurs camions à faible capacité.

Le nombre total de travailleurs dans la collecte est proportionnel au nombre de véhicules requis, d'où une augmentation significative dans les coûts de la main d'œuvre comparé au scénario conventionnel. Ce dernier utilisant des véhicules de grande capacité afin de minimiser les aller-retour ainsi que le coût des travailleurs. Dans ce cas-là, l'application de la TC risque de ne pas être rentable. La solution à cette contrainte serait alors l'utilisation des véhicules automatisés. Cette méthode alternative vise à éliminer les coûts dus aux travailleurs.

4.1.1 Véhicules alternatifs

À l'heure actuelle, plusieurs méthodes d'optimisation des véhicules de collecte sont présentes. Ces méthodes varient d'une simple optimisation de l'efficacité du moteur, vers une utilisation d'un véhicule complètement électrique, en passant par des véhicules ayant comme carburant le gaz naturel. Bien que ces méthodes aient pour but de minimiser les impacts environnementaux de la collecte ainsi que les impacts économiques qui se traduisent par la consommation de carburant, la plupart ne s'intéressent pas aux coûts générés par les

travailleurs. Les résultats de la présente étude indiquent que la plus grande partie des coûts de la collecte se concentrent dans la main d'œuvre (Tableau 4.1).

Tableau 4.1 Pourcentages de carburant et de main d'œuvre pour K_0 , K_1 et K_2

	Pourcentage des coûts de carburant	Pourcentage des coûts de main d'œuvre
K_0	5%	95%
K_1	15%	85%
K_2	22%	78%

Le Tableau 4.1 montre qu'une optimisation au niveau de la main d'œuvre s'avère rentable. C'est pour cela que dans quelques systèmes de collecte des matières recyclables, des camions à bras électrique sont utilisés. La présente étude suggère les Systèmes de Transport Cybernétique (STC) comme une alternative au camion de collecte conventionnel afin de réduire à la fois les coûts liés à la main d'œuvre et les impacts socio-économiques et environnementaux.

4.1.2 Les retombées socio-économiques

Une restructuration de la hiérarchie de la collecte des MR ajoute une flexibilité à la méthode traditionnelle. En fait, une collecte à l'aide d'un véhicule à faible capacité permet l'attribution d'un véhicule dédié à la collecte d'une seule catégorie de matières. À titre d'exemple, pour collecter un territoire, les véhicules de collecte seront divisés en catégories : certains véhicules de collecte de papiers et cartons, d'autres pour le verre, d'autres pour le métal etc. Présentement, ce niveau de flexibilité, ne peut pas être atteint à l'aide des camions bennes. Ceci est principalement dû à leur capacité élevée. En fait, une collecte sélective flexible signifie une faible quantité de matières à collecter par arrêt. Par conséquent, un véhicule à grande capacité devra parcourir une grande distance et effectuer un grand nombre d'arrêts avant d'être rempli. Ce qui génère des coûts élevés.

En parallèle, cette flexibilité permet un tri sélectif à la source. Ainsi, les matières pourraient être acheminées directement de la zone de collecte aux usines de traitement. Par conséquent, l'implémentation d'un centre de transbordement ou de tri ne serait pas forcément nécessaire. De plus, un système de transport tel que le STC, permettra de gérer les flux de matières entre les différentes filières de traitement. Cette gestion harmonieuse entre les différentes usines de traitements de matières est la base d'une gestion multi-filières des matières résiduelles. Cette nouvelle gestion des MR pourrait s'effectuer à une échelle locale d'une ville.

D'un autre côté, la fréquence de collecte des MR pourrait augmenter, puisque le véhicule est automatisé et se remplit relativement vite. Ceci permet d'offrir un autre type de flexibilité dans la collecte, qui pourrait même aller vers une collecte des MR sur demande. Un concept proche de celui de la livraison à domicile sur demande. Sauf que, dans ce cas-là, les biens ne sont pas livrés, mais plutôt ramassés.

4.1.3 Les retombées environnementales

La collecte conventionnelle des MR génère plusieurs impacts sur l'environnement. La combustion de carburant engendre une émission de gaz à effet de serre accompagné par une émission de particules et de poussières pouvant affecter la santé des habitants. De plus, le bruit et l'odeur produits par les camions s'inscrivent dans une autre catégorie de pollution. Par ailleurs, dû à leur grande taille et leur faible vitesse, les camions augmentent le risque de congestion routière surtout dans les ruelles étroites. Une collecte selon la théorie constructale permet une répartition optimale des flux dans le système. En d'autres termes, la distance totale parcourue sera minimale, et par conséquent la combustion de carburant sera réduite, minimisant ainsi les impacts sur l'environnement. Par ailleurs, l'utilisation des STC à la place du camion de collecte conventionnel élimine la dépendance des véhicules au carburant, et la remplace par une source d'énergie ayant un impact minime sur l'environnement : l'électricité.

4.2 Perspectives

Le modèle développé dans cette étude se base sur l'axe économique pour proposer une alternative à la collecte conventionnelle. En outre, une analyse qui combine les facteurs socio-économiques et environnementaux est requise afin d'aider les preneurs de décision à mieux choisir entre les alternatives possibles à la collecte conventionnelle. C'est pour cela, et dans le but de développer le modèle proposé, il est suggéré d'y ajouter les facteurs sociaux et environnementaux de façon à ce que le résultat de la constructale soit une pondération des trois axes : social, économique et environnemental.

Un changement du mode actuel de collecte des matières résiduelles requiert un processus détaillé composé de plusieurs étapes transitoires. Cela étant dans le but de minimiser les risques posés par une telle transition. Une première étape dans ce processus pourrait être un projet pilote au sein d'un parc industriel. Dans les faits, un parc industriel constitue un réseau de filières dépendantes les unes des autres. En d'autres termes, les produits/déchets d'une filière, pourront servir comme matière première à une autre. Un tel moteur de la gestion multi-filières aura besoin de flexibilité en matière de transport, parce que les matières produites dans une filière devront être acheminées à une multitude de filières voisines. L'utilisation du camion conventionnel de collecte pose quelques contraintes à la productivité des usines :

- les usines sont dans l'obligation de produire en quantité suffisamment grandes afin de remplir les camions qui se dirigent vers les filières partenaires. Ceci augmente la demande, par conséquent, les filières doivent avoir une grande taille afin de pouvoir satisfaire à cette demande. D'où la centralisation des parcs industriels à l'échelle d'une ou plusieurs villes;
- les distances à parcourir sont considérables, ce qui génère des coûts élevés pour le carburant et la main d'œuvre;
- l'utilisation de camion à compactage génère des impacts sur l'environnement, tels que les gaz à effets de serre, la poussière, le bruit etc.;

- les risques d'accident de travail peuvent augmenter dû à la grande taille du véhicule.

Une alternative à ce mode de transport pourrait prendre la forme d'un STC sur le territoire d'un parc industriel. Les flux de matières sont alors régis par la loi Constructale. En fait, les véhicules à faible capacité permettent la décentralisation des parcs industriels de façon à ce que la taille des filières ne soit pas contrainte par les moyens de transport entre les filières. De plus, la faible consommation d'électricité et l'automatisation des STC réduit les coûts liés au carburant et à la main d'œuvre. D'un autre côté, puisque les STC ne consomment pas de combustibles fossiles, leurs effets sur l'environnement est réduit. Enfin, grâce à la technologie de détection d'obstacles, le risque d'accidents de travail est mineur.

Une fois le nouveau mode de collecte installé, les résultats doivent être analysés afin d'en déduire les conclusions pour évaluer la possibilité d'installer ce mode en ville.

La deuxième étape du processus d'intégration, sera le lancement d'un projet pilote au niveau d'un quartier en ville. Cette étape vise d'un côté à évaluer le comportement du nouveau mode en face de l'incertitude et d'un autre à observer la réaction des citoyens à un tel changement. Si le projet est réussi, le système pourrait être graduellement installé à l'échelle de chaque quartier dans une ville.

Le monde se dirige aujourd'hui vers l'automatisation en matière de transport. Plusieurs projets Européens tels que CityMobil et Cybercars2 exploitent l'intérêt dans ce domaine. En 2012, le géant de l'internet Google a investi afin de construire des véhicules complètement autonomes se basant sur les technologies de Google tels que *Google Street View* pour naviguer en ville. Le futur repose certainement sur l'automatisation des transports. La présente étude propose l'utilisation d'une loi naturelle déterministe afin de contrôler les flux résultants d'une telle automatisation.

4.3 Recommandations

La présente étude propose une division de la collecte actuelle en 3 niveaux distincts selon une nouvelle théorie déterministe : la théorie constructale. Le modèle développé sert à des fins de démonstration uniquement. Il serait intéressant d'étendre les calculs dans le modèle en ajoutant des variables recueillies d'une collecte actuelle des MR, ainsi approchant ce dernier de plus en plus de la réalité. Il serait également pertinent d'établir la comparaison socio-économique entre les camions de collectes hybrides et les STC. Par ailleurs, une étude de faisabilité sera nécessaire avant d'effectuer un projet pilote permettant l'implémentation de plusieurs points de décharges des MR sur un territoire. Une étude approfondie sur la possibilité de construction de micro-filières de traitement sur chaque point de décharge est envisageable. De plus, une étude plus globale reliant tous les acteurs du cycle de la gestion des MR est préférable. Enfin, la possibilité d'une gestion multi-filière au niveau d'un territoire réduit est à considérer.

CONCLUSION

La phase de collecte génère des coûts importants dans le processus de la gestion des MR. Ces coûts sont principalement dus à la consommation de carburant et à la main d'œuvre. De plus, la collecte génère des impacts sur l'environnement, en fait, la consommation de diesel est une source significative de gaz à effet de serre, de bruits, de poussières etc. Enfin, les camions conventionnels de collecte augmentent les risques de congestion et de collision. La présente étude propose l'application de la loi Constructale pour gérer les flux d'un tel système. La perspective de l'application de la TC étant une réduction du coût global du système.

Le principe de la TC est celui de la réduction de la résistance globale du système. Elle a été utilisée dans plusieurs domaines scientifiques tels que le transfert de la chaleur, le transport des liquides et finalement le transport des biens.

Les résultats montrent que la théorie constructale, appliquée aux véhicules conventionnels ne sera plus économique qu'à partir d'une certaine densité (4000 hab/km^2) en considérant les hypothèses suivantes : 1) la génération des matières résiduelles est constante dans chaque point du système, 2) le camion de collecte effectue un seul passage par rue. Ceci est dû aux coûts de main d'œuvre élevés, puisque la constructale propose l'utilisation de plusieurs véhicules à capacité réduite pour collecter la même quantité qu'un camion à grande capacité. Une alternative aux véhicules conventionnels sera les systèmes de Transport Cybernétique (STC). Les STC sont des véhicules automatisés contrôlés par une station centrale. Ces véhicules pourront remplacer le véhicule de collecte actuel dans la hiérarchie des transports vers le centre de transbordement.

La division du territoire de collecte en plusieurs zones élémentaires à la périphérie desquelles sont situés des points de décharges des MR, permettra l'établissement d'une gestion multi-filières à l'échelle d'un territoire à superficie réduite. Cette approche permet une réduction des coûts de transports grâce aux faibles distances séparant les zones collectées des filières de traitement.

ANNEXE I

LES ALGORITHMES DE ROUTAGE

Tableau-A I- 1 Les variantes du problème de routage et leurs algorithmes de résolution

Variante du problème de routage des véhicules (VRP)	Acronyme	Algorithmes de résolution	Description du problème	Source
<i>Capacitated vehicle routing problem</i>	<i>CVRP</i>	<i>Artificial Bee Colony (ABC), Quantum Evolutionary (QA)</i>	Optimisation de la distribution de véhicules afin de collecter ou distribuer des biens d'un dépôt vers plusieurs clients	(Brajevic, 2011; Zhao et al., 2009)
<i>Multi-depot vehicle routing problem</i>	<i>MDVRP</i>	<i>Genetic Algorithm (GA)</i>	Similaire au CVRP avec plusieurs dépôts	(Peiyou et Xinming, 2008)
<i>Period vehicle routing problem</i>	<i>PVRP</i>	<i>Guided Local Search Algorithm (GLS)</i>	Similaire au CVRP avec une fréquence des visites bien déterminée	(Jiang, Jiang et Liu, 2010)
<i>Split delivery vehicle routing problem</i>	<i>SDVRP</i>	<i>Memetic Algorithm with Population Management (MAPM)</i>	Similaire au CVRP avec une division des biens acheminés vers un même client	(Boudia, Prins et Reghioui, 2007)
<i>Stochastic vehicle routing problem</i>	<i>SVRP</i>	<i>hybrid particle swarm optimization (H-PSO)</i>	Un problème de routage ayant une demande stochastique et variante	(Lu et Tan, 2006)
<i>Vehicle routing problem with pick-up and delivery</i>	<i>VRPPD</i>	<i>Combinaison de Tabu Search Algorithm et Guided Local Search Algorithm</i>	Considère les clients qui ont besoin de collecte et de distribution de biens simultanément	(Meng et Guo, 2008)

ANNEXE II

LES STC ACTIFS

	Origin	Web Reference
Supported: Captive Guideway		
Flexitaxi	Russia	None
Mitchell Transit Systems	United States	None
MAIT	Germany	www.maitint.org
Skyweb Express	United States	www.taxi2000.com
Vectus	Korea	www.vectuspri.com
Supported: Open Guideway		
CyberCab	Netherlands	www.2getthere.eu/Personal_Transit/
CyberCar	France	www.cybercars.org
Flash	United States	www.members.cox.net/prtdesign/PRTpage.htm
Flexitrain	New Zealand	http://camdek.com
RUF	Denmark	www.ruf.dk
Serpentine	Switzerland	www.serpentine.ch
ULTra	England	www.atsltd.co.uk
Suspended ("hanging")		
FlyWay	Sweden	www.swedetrack.com
Higherway	United States	www.higherway.us
JPods	United States	www.intelligenttransportation.com
MISTER	Poland	http://mist-er.com
Monomobile	United States	www.monomobile.com
SkyTran	United States	www.skytran.net or www.unimodal.com
Transcar	Russia	www.transcar.ru

Figure-A II- 1 Les systèmes de transport cybernétique actifs.
Tirée de Cottrell et Mikosza (2008, p. 102)

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ademe. 2006. « Évaluation environnementale des plans d'élimination des déchets ». p. 72.
- Alagöz, AZ, et G Kocasoy. 2008. « Improvement and modification of the routing system for the health-care waste collection and transportation in Istanbul ». *Waste Management*, vol. 28, n° 8, p. 1461-1471.
- Anderson, J.E., R.D. Doyle et R.A. Macdonald. 1980. « Personal Rapid Transit ». *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, vol. 22, n° 8, p. 25-37.
- Apaydin, O., et MT Gonullu. 2007. « Route optimization for solid waste collection: Trabzon (Turkey) case study ». *Global NEST Journal*, vol. 9, n° 1, p. 6-11.
- BAPE, Bureau d'audiences publiques sur l'environnement. 1997. *Déchets d'hier, ressources de demain: rapport de la Commission sur la gestion des matières résiduelles au Québec: annexes*. Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 504 p.
- Basrur, S.V. 2000. « Health Effects of Noise ». *City of Toronto Community and Neighbourhood Services Toronto Public Health Promotion and Environment Protection Office*, 10 p.
- Bejan, A. 2003. « Constructal tree-shaped paths for conduction and convection ». *International journal of energy research*, vol. 27, n° 4, p. 283-299.
- Bejan, A., V. Badescu et A. De Vos. 2000. « Constructal theory of economics structure generation in space and time ». *Energy Conversion and Management*, vol. 41, n° 13, p. 1429-1451.
- Bejan, A., et S. Lorente. 2011. « The Constructal Law and the Design of the Biosphere: Nature and Globalization ». *Journal of Heat Transfer*, vol. 133, p. 011001.
- Bejan, A., et G.W. Merks. 2007. *Constructal theory of social dynamics*. Springer Verlag, 8 p.
- Benenson, R. 2008. « Perception pour véhicule urbain sans conducteur: conception et implémentation », 14 p.
- Benmimou, A., M. Lawson, A. Marques, G. Giustiniani et M. Parent. 2009. « Demonstration of Advanced Transport Applications in CityMobil Project ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2110, n° -1, p. 9-17.
- Bilitewski, B., G. Härdtle et K. Marek. 2006. « Handbook of waste management ». *Theory and practice, Seidel-Przywecki, Warsaw*, 147 p.

- Boudia, Mourad, Christian Prins et Mohamed Reghioui. 2007. « An effective memetic algorithm with population management for the split delivery vehicle routing problem ». In *4th International Workshop on Hybrid Metaheuristics, HM 2007, October 8, 2007 - October 9, 2007*. (Dortmund, Germany) Vol. 4771 LNCS, p. 16-30. Coll. « Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics) »: Springer Verlag.
- Brajevic, Ivona. 2011. « Artificial bee colony algorithm for the capacitated vehicle routing problem ». In *European Computing Conference, ECC '11, April 28, 2011 - April 30, 2011*. (Paris, France), p. 239-244. Coll. « Proceedings of the European Computing Conference, ECC '11 »: World Scientific and Engineering Academy and Society.
- Chung, SS. 2009. « Projecting municipal solid waste: The case of Hong Kong SAR ». *Resources, conservation and recycling*, 15 p.
- Coalition, National Low Income Housing. 2001. *The NIMBY Report: Smart Growth & Affordable Housing*. National Low Income Housing Coalition, 457 p.
- Corrales, Mark. 1996. « RESIDENTIAL AND INDUSTRIAL (SOLID) WASTE DISPOSAL SUPPORT PACKAGE », 32 p.
- Cottrell, W.D., et O. Mikosza. 2008. « New-Generation Personal Rapid Transit Technologies: Overview and Comparison ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2042, n° -1, p. 101-108.
- Davis, M.L., et D.A. Cornwell. 1999. *Introduction to Environmental Engineering W/ Unit Conversion Booklet*. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 234 p.
- Denhag. 2011. « Electric garbage truck for city centre ». <http://www.denhaag.nl/en/residents/to/Electric-garbage-truck-for-city-centre.htm>
Consulté le 23/12/2011.
- Ehrlich, P.R. 1968. « The population bomb ». *New York*, 240 p.
- Emery, A, A Davies, A Griffiths et K Williams. 2007. « Environmental and economic modelling: A case study of municipal solid waste management scenarios in Wales ». *Resources, conservation and recycling*, vol. 49, n° 3, p. 244-263.
- Eshet, T, MG Baron, M Shechter et O Ayalon. 2007. « Measuring externalities of waste transfer stations in Israel using hedonic pricing ». *Waste Management*, vol. 27, n° 5, p. 614-625.
- Everett, J.W., et S. Shahi. 1997. « Vehicle and labor requirements for yard waste collection ». *Waste Management & Research*, vol. 15, n° 6, p. 627.

- Gaines, L., A. Vyas et J.L. Anderson. 2006. « Estimation of fuel use by idling commercial trucks ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1983, n° -1, p. 91-98.
- Galvez-Cloutier, Rosa. 2010. « GESTION INTÉGRÉ DE DÉCHETS SOLIDES MUNICIPAUX », 57 p.
- Ghodoossi, L., et N. Eđrican. 2003. « Flow area structure generation in point to area or area to point flows ». *Energy Conversion and Management*, vol. 44, n° 16, p. 2609-2623.
- Glaus, M., R. Hausler et J. Bourgois. 2009. « Les systèmes de transport cybernétique: pour un transport collectif au service d'une mobilité urbaine individualisée », 14 p.
- Hansen, U. 2000. « Reverse logistics is the key for remanufacturing and a sustainable development ». In *Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. ISEE - 2000, 8-10 May 2000*. (Piscataway, NJ, USA), p. 238-42. Coll. « Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment (Cat. No.00CH37082) »: IEEE. < <http://dx.doi.org/10.1109/ISEE.2000.857655> >.
- Heitor Reis, A. 2008. « Constructal view of the scaling laws of street networks--the dynamics behind geometry ». *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 387, n° 2-3, p. 617-622.
- Ismail, Z, et SL Loh. 2009. « Ant Colony Optimization for Solving Solid Waste Collection Scheduling Problems ». *Journal of Mathematics and Statistics*, vol. 5, n° 3, p. 199-205.
- ISWA. 2008. « Waste Transfer Stations in Different Regions ». *INSTITUTE FOR SUSTAINABLE WASTE MANAGEMENT AND TECHNOLOGY*, 234 p.
- Jiang, Gui-Shan, Zhi-Bin Jiang et Shu-Jun Liu. 2010. « Improved guided local search-based algorithm for period vehicle routing problem ». *Shanghai Jiaotong Daxue Xuebao/Journal of Shanghai Jiaotong University*, vol. 44, n° 9, p. 1171-1175.
- Kapepula, KM, G Colson, K Sabri et P Thonart. 2007. « A multiple criteria analysis for household solid waste management in the urban community of Dakar ». *Waste Management*, vol. 27, n° 11, p. 1690-1705.
- Kiel, K., V. Matheson et K. Golembiewski. 2010. « Luck or skill? An examination of the Ehrlich–Simon bet ». *Ecological Economics*, vol. 69, n° 7, p. 1365-1367.
- Knoke, T., et J. Bocker. 2007. « Optimal Power Train Design of a Hybrid Refuse Collector Vehicle ». In., p. 815-820. IEEE.

- Larsen, Anna W., Marko Vrgoc, Thomas H. Christensen et Poul Lieberknecht. 2009a. « Diesel consumption in waste collection and transport and its environmental significance ». *Waste Management and Research*, vol. 27, n° 7, p. 652-659.
- Larsen, AW, H Merrild, J Møller et TH Christensen. 2009b. « Waste collection systems for recyclables: An environmental and economic assessment for the municipality of Aarhus (Denmark) ». *Waste Management*, 15 p.
- Lemann, Martin. 2008. *Waste management*. Bern; Berlin; Bruxelles; Frankfurt, M; New York, NY; Oxford; Wien: Lang, 234 p.
- Lorente, S., et A. Bejan. 2010. « Few large and many small: hierarchy in movement on earth ». *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, vol. 5, n° 3, p. 254-267.
- Lu, Lin, et Qing-mei Tan. 2006. « Hybrid particle swarm optimization algorithm for stochastic vehicle routing problem ». *Systems Engineering and Electronics*, vol. 28, n° 2, p. 244-7.
- Masters, G.M., et W. Ela. 1991. *Introduction to environmental engineering and science*. Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ, 185 p.
- Meng, Lijun, et Xiaochai Guo. 2008. « A new hybrid metaheuristics for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery ». In *2008 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics, IEEE/SOLI 2008, October 12, 2008 - October 15, 2008*. (Beijing, China) Vol. 1, p. 1198-1202. Coll. « Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics, IEEE/SOLI 2008 »: Inst. of Elec. and Elec. Eng. Computer Society. < <http://dx.doi.org/10.1109/SOLI.2008.4686581> >.
- Montréal. 2008. « Portrait des matières résiduelles Montréal 2008 », 18 p.
- Montréal, Ville de. 2005. « Le transbordement des matières résiduelles sur l'île de Montréal », 58 p.
- Montréal, Ville de. 2006. « Évaluation des choix technologiques de traitement des matières résiduelles pour l'agglomération de Montréal », 34 p.
- Nguyen, T.T.T., et B.G. Wilson. 2010. « Fuel consumption estimation for kerbside municipal solid waste (MSW) collection activities ». *Waste Management & Research*, vol. 28, n° 4, p. 289.
- NSW, Department of Environment and Climate Change. 2008. « Better Practice Guide for Waste Management in Multi-Unit Dwellings », 254 p.

- Ominous. 2011. « www.ominousweather.com/GarbageTruck.html visitée le 10/12/2011. ».
- OSW, The office of Solid Waste. 2001. « Waste transfer stations a manual for decision making ». *United States Environmental Protection Agency*, 201 p.
- Pastorello, Cinzia, Panagiota Dilara et Giorgio Martini. 2011. « Effect of a change towards compressed natural gas vehicles on the emissions of the Milan waste collection fleet ». *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 16, n° 2, p. 121-128.
- Peiyou, Chen, et Xu Xinming. 2008. « A hybrid algorithm for multi-depot vehicle routing problem ». In *2008 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI), 12-15 Oct. 2008.* (Piscataway, NJ, USA) Vol. vol.2, p. 2031-4. Coll. « 2008 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI) »: IEEE. < <http://dx.doi.org/10.1109/SOLI.2008.4682866> >.
- Philip, Lawn. 2010. « On the Ehrlich–Simon bet: Both were unskilled and Simon was lucky ». *Ecological Economics*, vol. 69, n° 11, p. 2045-2046.
- PIKON, K, et K GASKA. 2010. « Greenhouse Gas Emission Mitigation Relevant to Changes in Municipal Solid Waste Management System ». *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 60, n° 7, p. 782-788.
- Québec. 2000. « «Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008.» ». *Gazette officielle du Québec*, vol. 30, p. 968.
- Québec. 2009. « «Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 2011-2015.» ». *Gazette officielle du Québec*, vol. 30, p. 968.
- Sahoo, S., Kim Seongbae, Kim Byung-In, B. Kraas et A. Popov, Jr. 2005. « Routing optimization for waste management ». *Interfaces*, vol. 35, n° Copyright 2005, IEE, p. 24-36.
- Saint-Étienne. 2010. « Rapport Annuel – Année 2010 sur le prix et la qualité du service public d'élimination des déchets ménagers et assimilés », 24 p.
- Simon, J.L. 1998. *The ultimate resource 2*. Princeton Univ Pr, 245 p.
- Skitt, J. 1992. *1000 terms in solid waste management*. ISWA, 50 p.
- Sonesson, U. 2000. « Modelling of waste collection—a general approach to calculate fuel consumption and time ». *Waste Management and Research*, vol. 18, n° 2, p. 115-123.

- Tavares, G, Z Zsigraiova, V Semiao et MG Carvalho. 2009. « Optimisation of MSW collection routes for minimum fuel consumption using 3D GIS modelling ». *Waste Management*, vol. 29, n° 3, p. 1176-1185.
- Ustundag, A, et E Cevikcan. 2008. « Vehicle Route Optimization for RFID Integrated Waste Collection System ». *International Journal of Information Technology and Decision Making*, vol. 7, n° 4, p. 611-625.
- Wilson, B.G. 2001. « Systems modelling of municipal solid waste collection operations », 25 p.
- Worrell, William A., et P. Aarne Vesilind. 2011. *Solid Waste Engineering*. Stamford, Conn: Cengage Learning, 245 p.
- Zhao, Yan-Wei, Dian-Jun Peng, Jing-Ling Zhang et Bin Wu. 2009. « Quantum evolutionary algorithm for capacitated vehicle routing problem ». *Xitong Gongcheng Lilun yu Shijian/System Engineering Theory and Practice*, vol. 29, n° 2, p. 159-166.

