

Développement d'une approche d'évaluation de la
performance énergétique des processus de collecte et de
transport associés à une filière de valorisation des matières
résiduelles au sein d'un territoire

par

Rosario CORBO GHIOLDI

THÈSE PAR ARTICLES PRÉSENTÉE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DU
DOCTORAT EN GÉNIE
Ph.D.

MONTREAL, LE 7 OCTOBRE 2024

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Rosario Corbo Ghioldi, 2024



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY
CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Mathias Glaus, directeur de thèse
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Patrice Seers, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Robert Hausler, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Cheikh Mouhamed Fadel, Kébé, membre externe du jury
Département de génie électrique à l'École Supérieure Polytechnique de l'université Cheikh
Anta Diop (ESP-UCAD)

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

LE 14 AOÛT 2024

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

Développement d'une approche d'évaluation de la performance énergétique des processus de collecte et de transport associés à une filière de valorisation des matières résiduelles au sein d'un territoire

Rosario CORBO GHIOLDI

RÉSUMÉ

L'économie actuelle repose sur une économie linéaire qui est majoritairement basée sur le principe d'extraction des ressources pour la production de biens qui, après utilisation, sont jetées. L'augmentation de la population et des matières résiduelles générées entraîne une prise de conscience en regard des enjeux environnementaux et un intérêt pour des mesures propices à la réutilisation, recyclage et/ou valorisation de ces matières.

Basé sur une approche systémique, le projet de recherche s'est intéressé à l'étude énergétique de la chaîne de valorisation des matières résiduelles, particulièrement à l'évaluation de la performance énergétique de la chaîne des processus de collecte et de transport qui composent une filière de valorisation des matières résiduelles au sein d'un territoire. Organisée en trois volets, la thèse aborde dans un premier temps la hiérarchisation des modes de collecte et de transport en s'appuyant sur les principes de la théorie constructale. Les résultats ont démontré qu'une structure de collecte à quatre niveaux est énergétiquement plus efficiente qu'une structure conventionnelle. Le deuxième volet de la thèse présente une approche d'intégration des caractéristiques spatiales du territoire (densités du réseau routier et de la population) à l'évaluation de la performance des processus de collecte et de transport appliquée aux conditions d'une filière de biométhanisation des matières résiduelles organiques. Les résultats permettent de mettre en perspective les limites d'efficience de la filière de valorisation en regard des distances à parcourir pour la collecte et le transport des matières résiduelles, et ce, pour des paramètres de territoires qui sont caractéristiques des régions québécoises. Le troisième volet met en application l'approche proposée au volet précédent pour un territoire composé d'une diversité de sous-entités territoriales (municipalité régionale de comté-MRC) avec leurs propres caractéristiques spatiales. L'application de l'approche a permis de mettre en lumière l'intérêt de scénarios de délocalisation des unités de traitement des matières résiduelles en s'appuyant sur la caractérisation des contributions de chaque sous-entité territoriale à la performance énergétique des différents scénarios considérés.

L'approche proposée dans le projet de recherche introduit une méthodologie de découpage du territoire pour faciliter l'analyse systémique de la chaîne globale de valorisation tout en proposant de pistes de solutions pour améliorer leur performance. L'analyse à l'échelle territoriale montre que la localisation du centre de valorisation détermine les pertes énergétiques de la chaîne globale de valorisation. À une échelle globale, l'analyse de la gestion intégrée des matières résiduelles inclut aussi les impacts environnementaux liés aux infrastructures des centres de valorisation. Cette approche est basée sur une analyse multidimensionnelle et permet la planification de la gestion intégrée des matières résiduelles.

Mots clés : valorisation des matières résiduelles, structures de transport, analyse multidimensionnelle

Development of an approach for the energetic performance of the waste management process for a territorial recovery

Rosario CORBO GHIOLDI

ABSTRACT

Modern society is based on a lineal economy model, in which the resources are extracted to production and after their use, these products are discarded as waste to the environment. The increase of the world's population and the generated waste is driving awareness concerning environmental issues and a growing interest on reuse, recycling, and recovery of materials.

Based on a systemic approach, this research project develops an approach to assess the energetic performance for the waste recovery process, considering the processes of collection and transportation attached to the recovery processes of the waste materials in the territory. Organized in three different parts, the first part of this project sheds light on the hierarchization of the collection and transportation based on the constructal theory. The results demonstrated that the structure of collection using 4 levels is energetically more efficient than the commonly used structure with 2 levels. The second part of this project presents an approach for the integration of the spatial characteristics of the territory (densities of the traffic system and population) to the evaluation of the performances of the processes of collection and transportation applied to the biomethane recovery of organic waste. The results show the efficiency limits of the biomethane recovery regarding the travelled distances for the collection and transportation of waste materials, including the territorial characteristics of the Québec regions. The third part of the project is based on the proposed approach of the second part to a territory formed by smaller territories (municipalities) with different spatial characteristics. This approach sheds light on the impact of the decentralization of the recovery facilities for the waste materials based on the territorial characterization of each municipality and the energetic performance of the scenarios considered.

The approach developed in this research project contributes to the systemic analysis of the global chain of material recovery suggesting new avenues worth exploring to increase their performance. Concerning the location of the recovery facilities, the integration of the material recovery process to the waste management process allows for a comprehensive study of the environmental impacts of the recovery centers at a territorial level.

Key words: recovery of materials., transportation structures, multidimensional analysis

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	5
1.1 Situation de la gestion des matières résiduelles	5
1.1.1 Historique.....	5
1.1.2 Enjeux associés à la gestion intégrée des matières résiduelles	9
1.1.3 Filières de traitement.....	14
1.2 Outils réglementaires et politiques de gestion de matières résiduelles	15
1.2.1 Encadrement de la gestion des matières résiduelles	15
1.2.2 Améliorations de la gestion des matières résiduelles.....	16
1.2.3 Politiques mises en place pour l'amélioration de la gestion des matières résiduelles.....	21
1.3 Approche et outils pour une gestion intégrée des matières résiduelles	23
1.3.1 Approche systémique	23
1.3.2 Approche territoriale liée à la collecte des matières résiduelles	28
1.3.3 Dimension spatiale pour la gestion des matières résiduelles	30
CHAPITRE 2 PRÉSENTATION DU PROJET DE RECHERCHE	33
2.1 Hypothèses de recherche.....	33
2.2 Objectifs généraux et spécifiques	35
CHAPITRE 3 DESIGN OF MATERIAL TRANSPORTATION SYSTEMS FOR SUSTAINABILITY	39
3.1 Abstract.....	39
3.2 Introduction.....	40
3.3 Literature review	42
3.3.1 Hierarchical structure and constructal theory	42
3.3.2 Constructal theory applied to material collection and transportation	44
3.4 Data and methodology	46
3.4.1 Analysis of different structures	46
3.4.2 Calculations for human transportation method.....	49
3.4.3 Calculations for power engine vehicles	50
3.4.4 Energy costs and time of the transport structures	51
3.5 Results.....	52
3.5.1 Comparison of structures	52
3.5.2 Improvement of transportation method.....	55
3.5.3 Time and transportation method	56
3.6 Discussion	58
3.7 Conclusion	59

CHAPITRE 4	AVAILABILITY AND ALLOCATION OF MUNICIPAL ORGANIC WASTE FOR BIOMETHANE RECOVERY	61
4.1	Abstract	61
4.2	Introduction	62
4.3	Methodology	65
4.3.1	Territorial breakdown and distances for collection and transportation.....	66
4.3.2	Energy balance of the biomethane recovery process	69
4.4	Description of the study case: Québec, Canada.....	72
4.5	Results and discussion	74
4.5.1	Distance of collection of municipal organic waste in the area	75
4.5.2	Energy balance of the global chain of biomethane recovery system	77
4.5.3	Impact of recuperation of organic waste	79
4.6	Conclusion	82
CHAPITRE 5	ENERGY OF THE CHAIN'S SERVICE AREA OF THE BIOMETHANE RECOVERY CONSIDERING DIFFERENT LEVELS OF TRANSPORTATION OF THE MUNICIPAL ORGANIC WASTE.....	85
5.1	Abstract	85
5.2	Introduction	86
5.3	Methodology	89
5.3.1	Energy losses of collection and transport level 1	91
5.3.2	Energy losses of transport level 2	96
5.3.3	Location of the recovery facility	97
5.4	Description of the study case: Montérégie, Québec, Canada	97
5.5	Results and discussion	99
5.5.1	Losses of energy depending on the different levels of transport	101
5.5.2	Comparison of different scenarios and digester location	102
5.5.3	Allocation of municipal organic waste	105
5.6	Conclusion	108
CHAPITRE 6	DISCUSSION GÉNÉRALE	111
6.1	Retour sur les travaux de recherche	111
6.1.1	Mise en perspective des résultats	111
6.1.2	Retour sur l'approche développée.....	114
6.2	Filières de valorisation	116
6.3	Perspectives de recherche	117
6.3.1	Développement de la structure de collecte et transport	118
6.3.2	Approche territoriale intégrée de la valorisation des matières résiduelles.....	119
6.3.3	Adaptation du cadre d'évaluation	121
CONCLUSION.....		123
ANNEXE I	COÛTS DE TRANSPORT DES ORDURES MÉNAGÈRES	125
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		129

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Initiatives développées pour la protection de l’environnement	7
Tableau 1.2 Données des matières recyclables de 2021 provenant de la collecte sélective adapté de RECYC-QUEBEC (2023, p.7)	11
Tableau 1.3 Calcul de taux de recyclage de la collecte sélective municipale en 2021 tiré de RECYC-QUEBEC (2023, p. 3).....	12
Tableau 1.4 Pourcentage des matières entrantes des centres de transfert selon leur provenance adapté de RECYC-QUEBEC (2023, p. 2).....	13
Tableau 1.5 Exemples de projets favorisant l’économie circulaire	25
Tableau 1.6 Facteurs d’émission selon les différentes méthodes de transport tiré de Béland and Zamboni (2023, p.5).....	29
Tableau 3.1 Description of the different scenarios created for the study	48
Tableau 3.2 Description of levels and payload used per level.....	48
Tableau 3.3 Parameters of the human transportation method for the collection in levels 1 and 2	50
Tableau 3.4 Results of values of the ratio R_i and the changes of this ratio for different scenarios	54
Tableau 3.5 Results of time and energy considering different scenarios and neighborhoods for different scenarios for the collection 10 tons of waste	57

Tableau 4.1	Scenarios, administrative regions, and density in the province of Québec, Canada.....	72
Tableau 5.1	Description of different scenarios	90
Tableau 5.2	Municipalities and density in the administrative region of Montérégie in Québec, Canada.....	100
Tableau 5.3	Energy losses of scenarios A and B	103
Tableau 5.4	Results of energy losses of transport level 2 for scenarios A, C and D	107

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Performance de la collecte municipale.....	13
Figure 1.2 Évolution des MR résidentielles de la ville de Gatineau, Québec	20
Figure 2.1 Présentation du projet de recherche.....	37
Figure 3.1(A) Representation of the elemental level of the constructal theory and (B) the construction of the second level adapted from Bejan et al. (2000, p. 1432)	43
Figure 3.2 Conventional scenario, curbside collection the only transportation method used is the utility truck.....	47
Figure 3.3 Description of different hierarchical levels created for the collection.	47
Figure 3.4 Energy costs of different scenarios for the different population areas	53
Figure 3.5 Energy Costs of the collection using different structures.....	56
Figure 4.1 Biomethane recovery system.....	63
Figure 4.2 Configuration breakdown grid type (n x n) centred on the recovery facility with the cell unit of collection represented by d ² dimensions for both configuration types: (1) even number of cell units in the grid to travel from the unit cell to the digester or (2) uneven number of units in the grid to travel from the unit cell to the digester	66
Figure 4.3 Production performance of biomethane production installations in Québec	74
Figure 4.4 Distance of collection and transportation on the territory	76
Figure 4.5 Energy results of the global chain of biomethane recovery every week.....	78
Figure 4.6 Energy balance of the global chain of biomethane recovery for different	80
Figure 5.1 Biomethane recovery process.....	87
Figure 5.2 Different levels of.....	90

Figure 5.3 Configuration breakdown grid type (n x n) centred on the recovery facility with the cell unit of collection represented by d^2 dimensions for both configuration types: (1) even number of cell units in the grid to travel from the unit cell to the digester or (2) uneven number of units in the grid to travel from the unit cell to the digester	91
Figure 5.4 Location of the Montérégie region (in red) in the province of Québec, Canada....	98
Figure 5.5 Production performance of biomethane production installations in Québec tiré ...	99
Figure 5.6 Energies of collection and transportation level 1 and level 2 for the scenario A.	102
Figure 5.7 Study of allocation of organic waste and location of the digester in the.....	106
Figure 6.1 Modèle du maillage de type (n x n) centré dans le centre de récupération avec la cellule unité représentée par la dimension d^2 pour les deux types de configuration (1) pour les chiffres pairs de cellules unitaires pour aller de la cellule unitaire jusqu'au digesteur et (2) pour les chiffres impairs de cellules unitaires pour aller de la cellule unitaire jusqu'au digesteur	113
Figure 6.2 Diagramme de l'outil développé	118

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

GES	Gaz à effet de serre
OCDE	Organisation de coopération et développement économiques
MR	Matière résiduelle
PMGMR	Plan métropolitain de gestion des matières résiduelles
BAPE	Bureau d’audiences publiques sur l’environnement
4R-VD	Réduction, récupération, recyclage, valorisation et disposition
3 RV	Réduction à la source, réutilisation, recyclage et valorisation
ICI	Secteur des institutions, des commerces et des industries
CRD	Secteur de la construction, de la rénovation et de la démolition
REP	Responsabilité élargie des producteurs
CMM	Communauté métropolitaine de Montréal
LET	Lieu d’enfouissement technique
LQE	Loi sur la qualité de l’environnement
SIG	Système d’intégration géographique

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

gCO ₂ éq/t.km	grammes équivalents de CO ₂ émis par tonne et par kilomètre
\$	dollar canadien
L	litre
kg	kilogrammes
t	tonnes
lb	libre
τ	Tortuosité
MET	<i>Metabolic equivalent of task</i>
W	Watt
m	Mètres
km	Kilomètre
m ²	mètres carrés
mpg	miles par gallon
s	seconde
h	heure
j	jour
kWh	kilowattheure
MJ	megajoule
GJ	gigajoule
Nm ³	mètre cube normal
hab	habitant

INTRODUCTION

Les matières naturelles sont utilisées pour les activités humaines sans considération de leur origine et leur consommation est dissocié de la capacité de renouvellement. Cette surexploitation contribue à l'érosion de la biodiversité : destruction d'habitats naturels, réduction des ressources disponibles pour les espèces sauvages, pollution, perturbation et mortalité de certaines espèces sauvages. Le rythme de la consommation des sociétés actuelles est encouragé par notre système économique sans considérer que ces conséquences vont au-delà de la quantité de déchet produit qui génère de la pollution ou de l'épuisement des ressources. La santé humaine, le bien-être, la justice sociale sont également bouleversés.

Les déchets sont indissociables des activités humaines et leur production ne peut être complètement évitée. Dans le cas des déchets municipaux, les villes sont tenues de collecter, transporter et traiter ou disposer les déchets générés sur le territoire. La gestion des déchets représente un défi important à plusieurs niveaux : les aspects économiques, mais aussi les impacts environnementaux de la gestion des déchets sont considérés. Ainsi plusieurs aspects sont liés à la pollution des différents types de traitement ou élimination des déchets comme les contaminants lixiviés ou ceux émis à l'atmosphère. Le transport des déchets génère aussi des contaminants à l'atmosphère comme les gaz à effet de serre (GES) et d'autres nuisances comme le bruit.

Les pratiques actuelles favorisant le recyclage et la valorisation ont graduellement transformé la gestion des déchets, vers une gestion des matières résiduelles (MR) qui pourraient être réutilisées. L'augmentation de la population mondiale et la surconsommation sont partiellement responsables de l'augmentation des déchets produits, donc une augmentation de la gestion des MR est observée dans les sociétés actuelles. La production de ces nouvelles ressources renouvelables implique plusieurs joueurs lors de la mise en place d'une logistique de récupération et de traitement des MR. En particulier, plusieurs procédés de valorisation des MR ont été mis en place à petite échelle dans de différents territoires, mais ces changements dépendent aussi de l'acceptabilité sociale. L'augmentation de génération de MR entraîne aussi

une augmentation de la consommation d'énergie pour la collecte et le transport des MR. Cette énergie est dépensée dans plusieurs activités de la chaîne globale de la valorisation des MR, comme la collecte et le transport des MR dans le territoire, mais aussi le traitement et le transport des MR vers le centre de valorisation.

Le bilan énergétique de la chaîne globale de valorisation des MR inclut dans un premier lieu, les pertes d'énergie lors du transport des MR qui sont liées aux distances parcourues et de l'autre côté, l'aspect technologique de la valorisation. Ainsi, deux axes de recherche se développent : un axe territorial qui se concentre sur les questions de transport et paramètres territoriaux et l'autre technologique qui se focalise sur les procédés de valorisation. Il apparaît pertinent de croiser les angles d'analyse, pour contribuer à la construction d'un outil d'aide à la prise de décision éclairée en matière de stratégies industrielles et territoriales. Ce type d'approche globale permet de saisir l'ensemble des dimensions qui entrent en jeu dans la mise en place des activités de la gestion intégrée des MR. Ces différentes dimensions contribuent d'une part à analyser les conditions favorables à son déploiement et, d'autre part, à étudier l'impact de la localisation des centres de valorisation et les pertes énergétiques associées. Dans ce contexte, le projet de recherche développe une approche systémique basée sur l'analyse énergétique de la chaîne de valorisation des MR,

Le présent manuscrit est construit en sept chapitres. Le premier présente une revue de littérature décrivant les principes sur lesquels s'appuie la gestion des déchets et les outils utilisés pour la valorisation des MR. Le deuxième chapitre introduit le problème de recherche en exposant les lacunes sur lesquelles il repose ainsi que les trois hypothèses et objectifs spécifiques poursuivis. Le troisième chapitre est consacré au premier article qui illustre l'utilisation de différents véhicules pour la collecte et transport afin de déterminer la structure du système de gestion des déchets, pour différentes conditions territoriales. Dans le quatrième chapitre, qui concerne le deuxième article, l'étude porte sur l'évaluation du bilan énergétique pour la chaîne globale de valorisation pour cibler les zones du territoire énergétiquement favorables au scénario de valorisation proposé. Le bilan énergétique inclut les pertes d'énergie lors de la collecte et du transport des MR dans le territoire ainsi que les gains énergétiques de

la valorisation. Le cinquième chapitre correspond au troisième article et il inclut différents niveaux de transport dans la chaîne globale de valorisation, le deuxième niveau de transport représente les pertes lors du transport des MR quand le centre de valorisation est situé à l'extérieur du territoire. Le sixième chapitre propose une discussion générale donnant une synthèse des articles et de la thèse. Finalement, le septième chapitre présente une conclusion des travaux de recherche, incluant plusieurs niveaux de transport dans le territoire.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Ce premier chapitre présente une revue de littérature concernant les matières résiduelles (MR). Dans un premier temps, une revue de la littérature de l'évolution de la notion des MR est présentée et dans un deuxième temps, les outils réglementaires et les politiques associées aux MR sont analysés. Finalement, dans une troisième partie, les approches et outils utilisés selon une approche systémique pour la gestion des MR sont présentés.

1.1 Situation de la gestion des matières résiduelles

Les déchets ont longtemps été vus comme des résidus qui devaient être rejetés après l'utilisation des produits, cette section est dédiée au passage de cette vision linéaire à une vision où les déchets deviennent des MR qui seront utilisées comme intrants d'autres processus (Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 1997). Cette section présente dans un premier lieu le concept et l'évolution des MR, deuxièmement les enjeux associés à la génération de MR sont présentés. Troisièmement, les filières de traitement des MR sont analysées.

1.1.1 Historique

La demande globale de ressources naturelles est en augmentation depuis le siècle dernier, avec l'industrialisation des économies et la croissance de la population. La productivité des pays est très diverse selon le degré de développement de l'économie. Dans tous les cas, des efforts doivent être faits pour augmenter l'efficacité de l'utilisation des ressources naturelles utilisées et pour fermer les cycles de matière (Organisation de coopération et de développement économiques, 2021). Si des changements ne sont pas mis en place, la croissance du volume des ressources naturelles qui seront utilisées va créer une pression environnementale menant à

la dégradation des milieux naturels et à l'augmentation des émissions de GES et autres substances toxiques dans l'environnement.

La transition menant à l'augmentation de l'efficacité de l'utilisation des ressources naturelles dépend du contexte socio-économique du pays et les pays doivent fixer leurs propres priorités et mettre en place des politiques diverses pour réaliser cette transition. À l'échelle mondiale, l'extraction des ressources naturelles a plus que doublé entre 1980 et 2017, et il est attendu qu'elle sera encore doublée avant 2060. De plus, pour 2050, il est projeté que 55% de la population mondiale vivra dans les villes, ce qui démontre l'importance de la gestion des MR dans les villes (Organisation de coopération et de développement économiques, 2021).

La notion de déchets a changé au fil du temps pour passer d'une vision du déchet comme un rejet de l'activité passant à une matière résiduelle ayant une valeur, comme décrit dans la section sur la gestion des MR dans le rapport du Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (BAPE) 364 (Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 2022).

Par exemple, M. Poubelle, préfet de la ville de Paris à la fin du 19^e siècle, a fait passer des règlements entre 1883 et 1884 qui exigeaient que tous les déchets ménagers soient placés dans des contenants avec des couvercles. Les règlements prévoyaient aussi le tri des déchets en trois voies, soit : matières putrescibles, papier et verre. Mais il rencontre plusieurs obstacles et ces idées ne sont que partiellement acceptées. Jusqu'au 20^e siècle, de nombreux déchets continuent à être déposés dans les rues ou dans les cours d'eau des villes. Cette situation engendre des préoccupations de santé publique et cela force les gouvernements à créer des bureaux de santé publique responsables des enjeux d'hygiène et de salubrité publique (Béguin, 2013). En 1864, la ville de Montréal met en place un système de collecte pour gérer les ordures ménagères (Archives Montréal, 2012).

Pour faire face à l'augmentation des quantités de déchets, les villes ont mis en place des incinérateurs. L'Angleterre est le premier pays à avoir un incinérateur en 1870, en France le premier incinérateur voit le jour à Javel près de Paris en 1893, à Montréal le premier

incinérateur a été construit en 1929 dans le quartier Rosemont (Bureau d’audiences publiques sur l’environnement, 2022). Les problématiques associées aux impacts de l’industrialisation et de la consommation de masse comme la pollution de l’air et de l’eau, des déchets toxiques, la dégradation des sols et la destruction de l’habitat ont entraîné une prise de conscience environnementale dans les années 60 et 70 (Barles, 2014). Cela entraîne la création des agences, ministères ou organismes consacrés à la protection de l’environnement, le Tableau 1.1 présente les agences gouvernementales de plusieurs pays.

Tableau 1.1 Initiatives développées pour la protection de l’environnement

Pays	Réglementation	Date	Référence
États-Unis	Solid Waste Disposal Act, loi relative à l’amélioration du traitement des déchets	1965	(US EPA, 2013)
France	Création du ministère de l’Environnement	1971	(Charvolin, 2001)
	Directive européenne n° 75-442, relative à l’élimination des déchets	1975	(Legisfrance, 2023)
Canada	Loi canadienne sur la protection de l’environnement	1999	(Gouvernement du Canada, 2023)
Québec	Loi sur la Qualité de l’Environnement	1972	(Ministère de l’Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs, 2023)

Ces lois mettent en évidence la détermination de ces pays de réduire la production de déchets à la source, de recycler et de valoriser les déchets collectés et d’appliquer le principe du pollueur-payeur (Barles, 2014).

Pour gérer une quantité de déchets toujours grandissante, les incinérateurs généraient de grandes quantités de cendres qu'il fallait éliminer. De plus, l'incinération était une source de pollution de l'air, alors elle a perdu en popularité et l'enfouissement sanitaire est devenu une solution attrayante. Ce processus était peu coûteux, mais nécessitait de grands espaces et les sites d'enfouissement sont localisés proches des villes pour éviter des coûts de transport excessifs. Cette contrainte explique que les lieux d'enfouissement se sont développés plus en Amérique du Nord qu'en Europe où l'espace est un facteur limitant (Barles, 2014). Les lieux d'enfouissement sanitaire représentaient un progrès parce qu'ils donnaient une solution aux problèmes des dépotoirs classiques tels que la vermine et les mauvaises odeurs. Toutefois, les équipements de compaction, l'achat de terre pour le recouvrement journalier et la main d'œuvre nécessaire ont augmenté les coûts d'exploitation.

Comme la quantité des déchets grandit d'année en année, l'enfouissement sanitaire est devenu une solution pour gérer les déchets. La gestion de ce type de sites est connue pour avoir causé des nuisances au voisinage ainsi que la génération des contaminants atmosphériques et la contamination des eaux souterraines. Une conscience environnementale s'installe durant les années 60 et 70 qui remettent en question les impacts de l'industrialisation et la consommation de masse et les impacts sur l'environnement. Dans ce contexte, la population demande des pratiques d'enfouissement plus sécuritaires, ainsi le Règlement sur les déchets solides de 1978 établit la fermeture de plus de 1 000 dépotoirs pour la construction de lieux d'élimination au Québec (d'enfouissement sanitaire et incinération) répondant à des normes plus strictes pour prévenir la pollution de l'environnement (Barles, 2014). En 1991, le ministre de l'Environnement de l'époque a décidé que les 69 lieux d'éliminations sanitaires en exploitation n'étaient pas conformes à l'ensemble des exigences du Règlement et plusieurs dépotoirs continuaient d'exister.

En 1997, le gouvernement du Québec a publié le rapport 115 du Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (BAPE) ayant comme objectif la préservation des ressources naturelles et la mise en valeur des matières historiquement incinérées ou enfouies pour améliorer la

protection de l'environnement (Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 1997). Le rapport décrit les MR comme les résidus de post-consommation et des résidus générés par leur production et il introduit le processus de mise en valeur des résidus incluant le réemploi, le recyclage et la valorisation biologique et énergétique des MR. Il introduit le principe de pollueur-payeur qui établit que les coûts environnementaux sont imputés à ceux dont les actions ont un effet négatif sur l'environnement et il préconise la réduction à la source (Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 1997).

À partir des années 1960, diverses initiatives ont été progressivement mises en place pour récupérer certaines matières, telles que les canettes en aluminium et les bouteilles de bière ou de boissons gazeuses, pour leur réutilisation ou recyclage. Les premiers programmes de collecte sélective aux États-Unis datent des années 1960, au Québec la collecte sélective par apport volontaire débutait dans la région de Victoriaville à la fin de la même décennie et en 1989 la Politique de gestion intégrée des déchets solides et la première collecte sélective à Montréal ont vu le jour (Moreau, 2020).

1.1.2 Enjeux associés à la gestion intégrée des matières résiduelles

Les villes représentent deux tiers de la demande énergétique, produisant 50% des déchets solides et elles sont responsables de 70% des émissions de GES. Ainsi, les villes jouent un rôle essentiel dans la transition d'une économie linéaire vers l'économie circulaire (Organisation de coopération et de développement économiques, 2021).

À l'échelle mondiale, en 2012, la population urbaine était de 2,9 milliards de personnes qui génèrent 0,64 kg/hab/j, en 2022 la population urbaine était estimée à 3 milliards et la génération de déchets était de 1,2 kg/hab/j et les estimations pour 2025 sont de 4,3 milliards d'habitants qui généreront 1,42 kg/hab/j, ce qui représente 2,2 milliards de tonnes de MR par année (Hoornweg and Bhada-Tata, 2012).

Au Québec, en 2019, 96 % des MR étaient éliminées par enfouissement tandis que le reste était incinéré. Les lieux d'enfouissement technique (LET) représentaient seulement 19 % des lieux d'élimination, mais 92 % des MR éliminées étaient enfouies. Si l'enfouissement des MR et l'utilisation de recouvrement journalier se poursuivent au rythme de 2019, des 38 LET en exploitation au Québec, 9 devraient atteindre leur capacité maximale autorisée avant 2030, 13 autres entre 2030 et 2041 et seulement 16 après 2041 (Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 2022). En 2019, 546 000 chargements de MR ou de matériaux destinés au recouvrement ont été transportés vers des LET en exploitation. En 2019 pour le secteur municipal, les coûts unitaires moyens de l'élimination étaient supérieurs aux coûts de traitement des matières recyclables organiques (sans compter les frais de collecte et transport). Lorsque les coûts de transport sont inclus, le coût total pour les matières recyclables était plus élevé que celui de l'élimination. En 2019, les coûts de transport des MR du secteur municipal au Québec représentaient en moyenne 49% des coûts totaux liés à l'élimination. Ces coûts varient selon les régions, par exemple, 63 \$/t pour la région de Laval, 206 \$/t pour l'Outaouais et 281 \$/t en Gaspésie-Iles-de-la-Madelaine. Voir le tableau A I-1 pour les coûts liés à la collecte des MR pour les différentes régions de la province du Québec.

En 2019, la quantité de MR éliminée par habitant atteignait 724 kg, soit environ 3 % de plus que l'objectif fixé pour 2015 et 38 % de plus que l'objectif de 525 kg fixés pour 2023 dans le Plan d'action 2019-2024 (Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 2022). Le ministère de l'Environnement estime que cet objectif serait plutôt atteint en 2041, et ce, en dépit des réformes qui seront en place ou en cours d'implantation.

En 2020, le taux de récupération des matières recyclables de la communauté métropolitaine de Montréal (CMM) était de 63% et le taux de récupération des matières organiques était de 36%. Les quantités de matières récupérées ont passé de 164 kg/personne en 2017 à 215 kg/personne en 2020 et les quantités de matières éliminées sont passées de 283 kg/personne en 2017 à 258 kg/personne en 2020 ("Plan métropolitain de gestion des matières résiduelles | PMGMR," 2019).

Concernant la pollution provenant des LET, en 2018, en excluant les émissions associées à la collecte et au transport des MR, les lieux d'enfouissement du Québec ont émis près de 2,5 Mtéq. CO₂ soit 3% des émissions totales de GES du Québec (Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 2022).

Les MR sont générées principalement à partir de 3 grands secteurs : le secteur municipal, le secteur des institutions, des commerces et des industries (ICI) et le secteur de la construction, de la rénovation et de la démolition (CRD) (Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 2022). Le Tableau 1.2 montre la provenance par secteur des matières recyclables issues de la collecte sélective éliminées en 2021.

Tableau 1.2 Données des matières recyclables de 2021 provenant de la collecte sélective
adapté de RECYC-QUEBEC (2023, p.7)

Matières	Quantité par secteur (tonnes)		
	Municipal	ICI	CRD
Papier/carton	157 000	350 000	27 000
Métal	43 000	17 000	1 000
Plastique	158 000	207 000	13 000
Verre	29 000	21 000	3 000
Total 2021	388 000	594 000	44 000
Proportion (%)	38	58	4

Le gouvernement du Québec a adopté des mesures afin d'améliorer la gestion de MR et elles ciblent les principaux gisements de matières pouvant être recyclées ou valorisées, soit les matières organiques, les MR issues des ICI et du secteur CRD, ainsi que les matériaux alternatifs de recouvrement (Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 2022). Autres activités à prioriser sont la modernisation de la gestion des matières recyclables, la réduction du plastique à usage unique, la valorisation de la matière organique et le développement des différentes filières de récupération. Les initiatives du gouvernement incluent l'élargissement de la consigne et de la responsabilité élargie des producteurs (REP) (Ministère de

l'Environnement et la lutte contre les changements climatiques, 2020). Ces actions permettront de détourner de l'élimination des MR, mais parallèlement, cela permettra de consolider des filières de tri, de conditionnement et de recyclage. Ces mesures visent à améliorer la qualité de la matière récupérée, à encourager le recyclage local et à diminuer la dépendance aux marchés externes.

Le Tableau 1.3 montre les quantités de MR générées et recyclées ainsi que les taux de recyclage de la collecte sélective municipale en 2021, ces données concernent le secteur résidentiel et les ICI, mais en 2018 le taux de recyclage concernait seulement le secteur résidentiel.

Tableau 1.3 Calcul de taux de recyclage de la collecte sélective municipale en 2021
tiré de RECYC-QUEBEC (2023, p. 3)

Matières	Quantités (tonnes)		Taux de recyclage	
	Générées (A)	Recyclées (B)	(A/B)	(2018)
Papier et carton	647 000	461 000	71 %	71 %
Métal	73 000	35 000	48 %	48 %
Plastique	248 000	52 000	21 %	25 %
Verre	220 000	50 000	23 %	28 %
Autres matières	85 000	S.O.	S.O.	S.O.
Total	1 274 000	603 000	47 %	52 %

En ce qui concerne les MR au Québec, les collectes municipales desservent le secteur résidentiel et parfois le secteur ICI. La

Figure 1.1 montre la performance combinée des MR provenant des collectes municipales. Seulement 47% des MR générées par le secteur résidentiel et par le secteur ICI desservi ont été acheminées à des fins de recyclage (RECYC-QUEBEC, 2023).

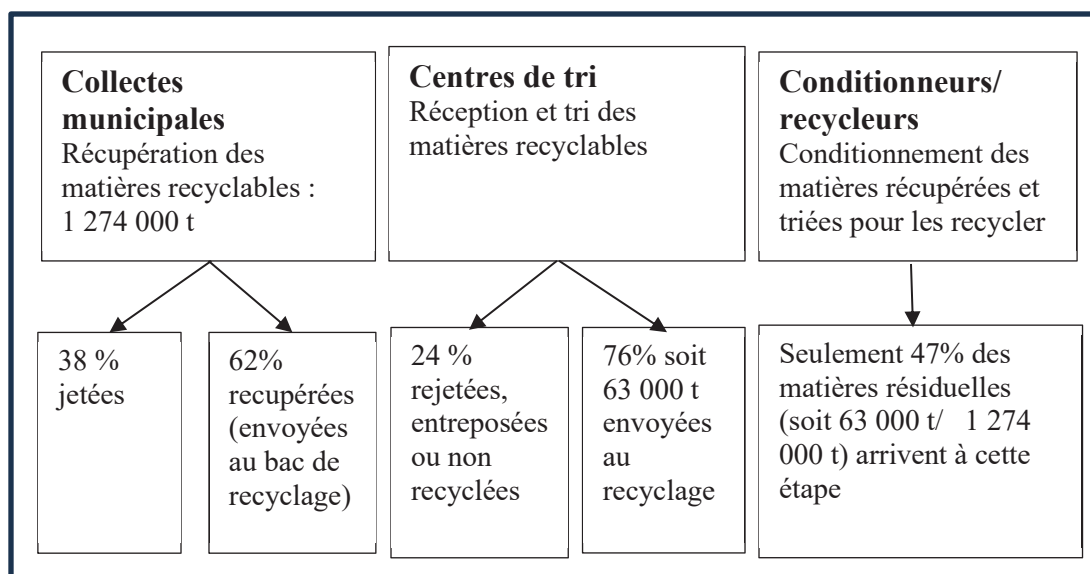


Figure 1.1 Performance de la collecte municipale
adapté de RECYC-QUEBEC (2023, p. 12)

Au Québec, les centres de transfert reçoivent des MR provenant principalement des collectes municipales et elles peuvent être 100% résidentielles ou mixtes résidentielle et du secteur ICI ou provenant uniquement du secteur ICI. Le Tableau 1.4 montre la répartition de matières reçues par les centres de transfert selon leur provenance (Fontaine, 2021).

Tableau 1.4 Pourcentage des matières entrantes des centres de transfert selon leur provenance
adapté de RECYC-QUEBEC (2023, p. 2)

Provenance des MR entrantes des centres de transfert au Québec				
Collecte sélective résidentielle	Collecte sélective du secteur ICI	Collecte sélective mixte	Autres centres de transfert	Autres sources
27,1 %	6,2 %	47,7 %	2,9 %	16,1 %

Les centres de transfert sont des centres utilisés où des MR de plusieurs provenances sont traitées ou simplement attendent à être transportées. La collecte pêle-mêle où les MR sont mélangées, représente 95,8 % des matières entrantes des centres de transfert au Québec (Fontaine, 2021).

La gestion des MR constitue un enjeu important en matière de développement durable et de responsabilité sociétale. Bien que la réglementation du Québec soit basée sur la REP, la responsabilité globale touche aussi la responsabilité citoyenne. La gouvernance doit impliquer tous les acteurs et les parties prenantes susceptibles d'influencer les décisions (ministère de l'Environnement et la lutte contre les changements climatiques, 2020).

1.1.3 Filières de traitement

Une filière de traitement des déchets est constituée d'un ensemble d'activités, qui peuvent être étudiées de manière indépendante, mais qui sont interconnectées (Larsen et al., 2009a). La filière proprement dite comprend les activités de collecte, transport, tri, traitement et valorisation. Les quatre premières activités nécessitent des ressources, sous forme d'énergie ou matières, mais l'activité de valorisation génère de l'énergie. La valorisation est liée aux ressources généralement fossiles substituées par le(s) produit(s) obtenu(s) par la valorisation (Larsen et al., 2009a). Ainsi les activités liées dépendent notamment des modes et technologies utilisées.

Au Québec, après la collecte, certaines MR sont envoyées directement à l'élimination tandis que d'autres sont transportées, triées et parfois conditionnées. Selon leur nature et leur condition, elles peuvent être acheminées vers les différents marchés au Québec, au Canada ou à l'international. Elles peuvent être réemployées, recyclées ou valorisées, dans la chaîne d'approvisionnement de l'industrie (Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 2022). De plus, les procédés de traitement peuvent également générer des sous-produits et des résidus, selon leur qualité et les possibles débouchés, ils peuvent à leur tour être mis en valeur ou éliminés (Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 2022). Pour la collecte des matières et le transport au centre de transfert, le même type de camion est utilisé, mais pour le transport vers le centre de valorisation d'autres moyens de transport pourraient être envisagés pour diminuer la consommation d'énergie.

L'énergie issue de la valorisation des MR collectées sur le territoire est influencée par deux phénomènes différents : d'un côté le potentiel énergétique de valorisation et d'un autre côté de la quantité de MR à valoriser. Le potentiel de la valorisation dépend de la technologie et des caractéristiques des procédés et en même temps la quantité de MR à valoriser dépend des comportements individuels des citoyens. Le principe de responsabilité est appliqué entre les producteurs et distributeurs pour ce qui est de la mise en valeur et les citoyens et municipalités en ce qui concerne l'élimination. Comme il revient aux citoyens de disposer les résidus des produits qu'ils consomment, ils acceptent aussi une responsabilité non négligeable en matière de la mise en valeur par leur participation à la collecte sélective et aux activités de compostage (Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 1997).

1.2 Outils réglementaires et politiques de gestion de matières résiduelles

Pour l'analyse des outils réglementaires concernant la gestion des MR, cette thèse analyse dans une première étape l'encadrement actuel de la collecte et la gestion des MR, dans une deuxième étape les améliorations concernant la gestion des MR et finalement les politiques qui permettent cette amélioration de gestion.

1.2.1 Encadrement de la gestion des matières résiduelles

L'efficacité de l'usage des ressources et la problématique des déchets est perçue différemment selon les différents pays et cela dépend de son contexte, de sa structure économique et de son stade de développement (Organisation de coopération et de développement économiques, 2021). Dans des pays émergents, la priorité est d'éliminer la disposition de déchets non contrôlée comme les dépôts désorganisés ou les feux à ciel ouvert et d'augmenter la population desservie par la collecte municipale. Tandis que dans les économies plus développées, où la gestion des déchets est déjà en place, la priorité est généralement basée sur l'augmentation des pourcentages de récupération des MR et la diminution de la génération de déchets. La transition menant à l'augmentation de l'efficacité de l'utilisation des ressources matérielles dépend du contexte socio-économique du pays et les pays doivent fixer leurs propres priorités et mettre

en place des politiques diverses pour réaliser cette transition (Organisation de coopération et de développement économiques, 2021).

Par exemple, au Québec, la loi sur la qualité de l'environnement (LQE) a comme objectif de conserver l'environnement et de doter le Québec d'un régime d'autorisation environnementale, en particulier l'article 20 encadre l'émission de contaminants dans l'environnement. Le règlement sur l'enfouissement et l'incinération de MR décrit les conditions d'exploitation ou de fermeture de divers lieux d'élimination et établit les matières que ne peuvent pas être enfouies. Il a comme objectif d'assurer la protection de l'environnement contre la pollution causée par l'élimination des MR. Les installations susceptibles d'émettre des contaminants à l'atmosphère sont régies par le règlement sur l'assainissement de l'atmosphère, il définit aussi le terme 'incinérateur'. Ainsi, ces deux derniers règlements viennent baliser l'exploitation des incinérateurs du Québec.

1.2.2 Améliorations de la gestion des matières résiduelles

Des pistes d'amélioration concernant la gestion des MR sont étudiées par le gouvernement du Québec pour augmenter les taux de récupération et augmenter l'efficacité d'utilisation des ressources matérielles (Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 2022). Par exemple, des modes de collecte séparée pour les matières recyclables permettent une meilleure qualité de chaque matière (Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 2022). Dans le cas des résidus de CRD qui proviennent des secteurs du bâtiment et de celui des infrastructures comme les routes, viaducs ou ponts, ils sont composés principalement de bois, de gypse, de bardeaux d'asphalte, de métaux, de carton et de plastique. Ces résidus de CRD peuvent être récupérés par les centres de tri spécialisés, toutefois la réglementation actuelle permet aussi qu'ils soient envoyés directement vers des lieux d'élimination. Dans ce cas, une réglementation plus sévère pourrait encourager l'augmentation du taux de récupération (Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 2022). Dans le cas des LET et des matériaux de recouvrement, plusieurs études sont réalisées pour l'utilisation de matériaux alternatifs de recouvrement pour permettre l'utilisation de certaines MR comme matériel alternatif de recouvrement (Bureau

d'audiences publiques sur l'environnement, 2022). Actuellement, l'industrie forestière et le secteur CRD sont les principales sources d'approvisionnement des installations de valorisation énergétique (RECYC-QUÉBEC, 2023a), mais la réglementation n'encourage pas le secteur CRD pour envoyer leurs résidus pour la récupération. Dans certains contextes, l'incinération avec la récupération d'énergie de résidus ultimes qui ne peuvent pas être réemployés ou recyclés pourrait être considérée comme de la valorisation énergétique (Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 2022).

À l'échelle mondiale, des initiatives d'amélioration sont étudiées concernant la collecte, le transport, le tri des MR ainsi que pour le processus de valorisation des MR. Concernant la collecte des MR, les résultats de l'étude de (Rogoff and Ross, 2017) par rapport aux différents types de contenants pour les MR indiquent que les contenants souterrains ont une capacité de collecte plus grande que le reste des contenants quand le volume et la charge sont au maximum. De plus, les contenants avec une petite surface ont un plus grand ratio volume/poids collecté, car les MR peuvent être compressées à l'intérieur du contenant. Les systèmes de collecte plus efficaces sont les systèmes de collecte automatiques (Rogoff and Ross, 2017). Les caractéristiques du territoire devraient aussi être considérées, pour permettre de diminuer les dépenses en énergie tant pour la collecte que pour le transport des MR (Liu et al., 2017). À Santiago au Chili, un modèle d'intégration linéaire avec un système d'intégration géographique (SIG) a été utilisé pour étudier la localisation des contenants de recyclage (Letelier et al., 2022). La collecte porte-à-porte des matières recyclables a été remplacée par des points de collecte où les citoyens doivent se déplacer pour déposer leurs matières. Les résultats de cette étude, mise en place pour diminuer les coûts de la collecte des matières recyclables, ont démontré que la génération des matières est estimée à 80% de la génération actuelle quand le point de dépôt des matières recyclables est placé à plus de 300 m et quand le contenant pour les matières a une capacité de 1 000 L.

Le transport des MR et la localisation des centres de transfert ont été étudiés par des modèles mathématiques (Kudela et al., 2019), ces méthodes étudient la taille des centres de transfert, la quantité de matières et le territoire ou les distances à parcourir pour collecter cette quantité.

Pour diminuer l'énergie dépensée lors du transport des MR, la distance entre le territoire et le centre de valorisation doit suivre le principe de proximité. Si la gestion des MR se fait à proximité de leur lieu de production, cela est vu comme une solution pour réduire les impacts environnementaux et les coûts liés au transport des MR et pour inciter les citoyens à s'impliquer au quotidien dans la réduction de la quantité des déchets rejetés (Bouchard-Bastien et al., 2021). La consommation d'énergie pour le transport est influencée par la relation entre la consommation de combustible, la vitesse et la quantité de matières transportées (Franzese and Davidson, 2011). De cette façon, l'utilisation de différentes méthodes de transport comme des méthodes de transport actif ou des véhicules électriques peut être utilisée pour diminuer l'empreinte énergétique de la collecte. En plus, l'utilisation de véhicules moins énergivores permet aussi de diminuer la consommation d'énergies fossiles. Dans le contexte urbain, l'utilisation d'autres modes de transport permet la diminution des problématiques en ce qui concerne le bruit comparé avec les camions de collecte (Lu et al., 2017) et la diminution de la congestion routière due à la circulation des grands camions dans les rues étroites des villes. De plus, l'utilisation de véhicules avec des technologies plus vertes et des moteurs plus performants entraîne aussi une diminution des émissions de GES (Lu et al., 2020), ce qui favorise une meilleure qualité de l'air en ville.

Pour le tri des MR, le potentiel de l'intelligence artificielle est un facteur important (Dubois, 2023). Par exemple, le tri des déchets de construction peut être réalisé grâce à des bras robotiques de tri robustes avec vision par ordinateur, ce type de technologie peut être utilisée pour des matériaux lourds comme le bois ou les agrégats destinés à faire des routes de chantier. Le tri des matières recyclables peut aussi profiter de cette technologie pour le tri des matériaux comme les métaux issus du recyclage électronique ou des matières recyclables résidentielles. De plus, la technologie peut aussi aider lors de la classification de pièces d'ordinateurs recyclés. L'intelligence artificielle peut être utilisée aussi pour le système de consigne (Dubois, 2023).

Pour augmenter la récupération des MR, en 2016, la ville de Beaconsfield au Québec a implanté une nouvelle stratégie de réduction des déchets, en même temps, la collecte

intelligente avec tarification consiste à tarifier les usagers en fonction de leur utilisation du service a été mise en place (Bourg, 2018). Les résultats de cette initiative entre 2013 et 2017 démontrent que les ordures ménagères ont diminué de 48%, les matières recyclables ont diminué de 5%, les matières organiques ont augmenté de 98%, les CDR et encombrants ont augmenté de 153% et le taux de récupération global a augmenté de 26%. Des données de contamination des MR dans le bac de recyclage ont aussi été analysées, et une augmentation de la contamination des MR récupérées a été observée (Bourg, 2018). La contamination des MR acheminés aux centres de tri est un paramètre à considérer, car une bonne qualité de la MR doit être garantie afin que les MR puissent être vendues.

La ville de Gatineau au Québec utilise la réglementation comme levier pour diminuer la quantité de déchets (Ville de Gatineau, 2021). L'évolution de la quantité de matières compostables collectées entre 2006 et 2013 montre qu'entre 2006 et 2011 la quantité de matière passe de 2 500 t/an à 11 000 t/an, mais après 2011, la quantité stagne à environ 20 000 t/an. Pour diminuer la quantité de déchets collectés, la ville de Gatineau a mis en place des actions spécifiques : l'interdiction de jeter des encombrants et des matières compostables dans les ordures ménagères, l'obligation de fournir des bacs bruns en quantité suffisante pour leurs citoyens, la diminution de la fréquence de collecte des ordures dans les multilogements et une collecte limitée à 120 L d'ordures par quinzaine pour chaque résidence. Le règlement interdisant les encombrants et les matières compostables dans les déchets a été mis en place en 2018 et la limite de collecte de 120 L d'ordures par quinzaine pour chaque résidence est entrée en vigueur en 2019. De plus, les actions prises par les gestionnaires de la ville de Gatineau ont permis d'améliorer la composition des ordures ménagères des citoyens de la ville, la Figure 1.2 montre l'évolution de la quantité de MR résidentielles collectée dans la ville de Gatineau, Québec.

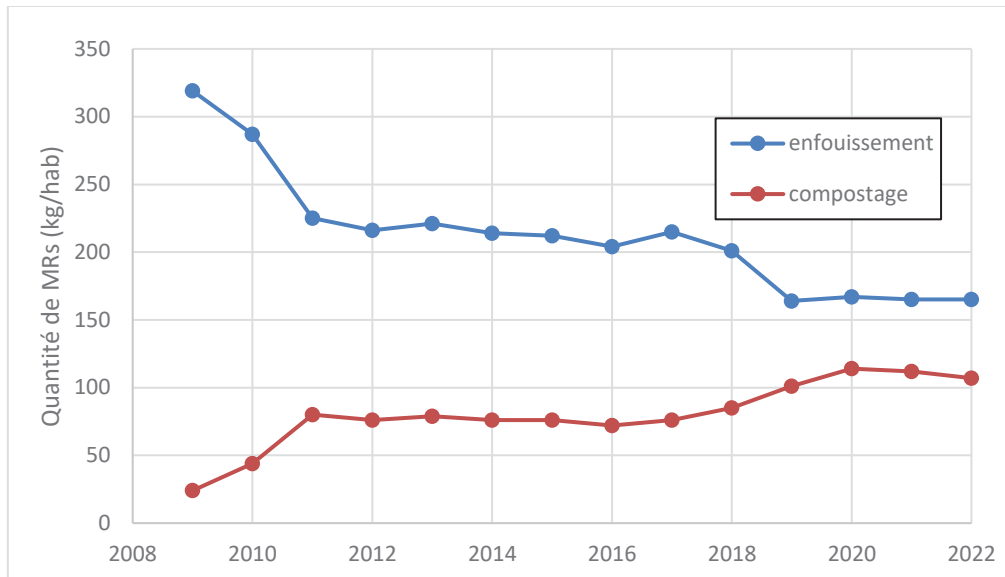


Figure 1.2 Évolution des MR résidentielles de la ville de Gatineau, Québec pour les filières d'enfouissement et compostage adapté de Ville de Gatineau (2021, p. 17)

Pour organiser la récupération et valorisation sur le long terme et à échelle mondiale plusieurs initiatives qui sont actuellement désorganisées et fragiles sont mises en place. Ainsi, selon le type d'industries présentes dans le territoire, plusieurs projets de recherche au niveau universitaire et des projets d'innovation institutionnelle visent à diminuer la contamination des industries plus polluantes (Weber, 2023). Dans le cas de l'industrie du recyclage du plastique, le développement des nouveaux secteurs requiert des efforts pour la formation du personnel, de l'émergence des centres techniques et de la stimulation des recherches et de l'innovation sur le sujet (Delchet, 2020). Dans le cycle de l'industrie textile, des ressources naturelles sont gaspillées et génèrent des émissions polluantes. Elle est responsable de l'émission de 1,2 milliard de tonnes de GES, et afin de diminuer le gaspillage, cette industrie fait l'objet de plusieurs initiatives locales (Chen et al., 2021). Ces initiatives incluent la planification des méthodes de production de matières premières renouvelables pour une utilisation maximale et encourageant la réutilisation des produits textiles et des stratégies de recyclage, la distribution de textiles pour les nouveaux marchés et la création de moyens pour augmenter la vie utile des textiles.

1.2.3 Politiques mises en place pour l'amélioration de la gestion des matières résiduelles

Au Québec, la gestion des MR s'articule autour du principe de hiérarchisation de réduction à la source, réutilisation, recyclage, valorisation (3RV). Ce principe accorde une priorité à la réduction à la source, le réemploi et le recyclage, ensuite la valorisation des résidus et finalement l'élimination sécuritaire comme dernier recours (RECYC-QUÉBEC, 2023b). Ce principe est une façon de prioriser les actions pour gérer les matières résiduelles, pour éviter qu'elles soient envoyées à l'enfouissement et éviter des dommages à l'environnement (Ville de Montréal, 2023). Dans une approche plus large, la philosophie de réduction, récupération, recyclage, valorisation et disposition (4R-VD) prône une approche intégrée des MR plutôt qu'une hiérarchie des actions. Cela permet le développement des systèmes avec une approche locale.

La LQE régule la gestion des MR au Québec et ses objectifs principaux sont : de prévenir ou réduire la production des MR, de promouvoir la récupération et valorisation des MR, de réduire la quantité à éliminer et d'assurer une gestion sécuritaire des installations d'élimination. De plus, elle a comme objectif d'obliger la prise en compte des effets des produits et leurs coûts de réparation, valorisation et élimination des fabricants et importateurs de produits. L'atteinte de ces objectifs est sous la responsabilité du ministère de l'Environnement du Québec, mais plusieurs paliers gouvernementaux sont chargés de la gestion des MR. Les plans et les programmes d'application de la politique sont élaborés par RECYC-QUÉBEC et ils doivent être préalablement approuvés par le ministre (RECYC-QUÉBEC, 2023c). D'un autre côté, la Loi sur la société québécoise de récupération et de recyclage confie à RECYC-QUÉBEC le mandat de promouvoir, de développer et de favoriser la réduction, le réemploi, la récupération et le recyclage de contenants, d'emballages, de matières ou de produits ainsi que leur valorisation dans une perspective de conservation des ressources (Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 2022).

Basée sur les objectifs du gouvernement du Québec et les principes des 3RV, la politique québécoise de gestion des MR a comme objectif fondamental de ‘créer une société sans gaspillage qui cherche à maximiser la valeur ajoutée par une saine gestion des MR’ (Bureau d’audiences publiques sur l’environnement, 2022). La politique est accompagnée de plans d’action quinquennaux qui visent à atteindre des objectifs intermédiaires. Le plan d’action 2019-2024 révisé les rôles et les responsabilités des entreprises et des municipalités (ministère de l’Environnement et la lutte contre les changements climatiques, 2020).

La loi modifiant principalement la LQE en matière de consigne et de collecte sélective et le règlement relatif à certaines mesures transitoires nécessaires pour l’application de la Loi modifient les dispositions législatives notamment pour réformer la gouvernance du Fonds Vert et ils ont comme objectif la modernisation de ces systèmes pour permettre la récupération des MR et une augmentation du taux de recyclage. L’approche de REP implique que les entreprises deviennent responsables des produits finis qu’elles fabriquent, par exemple : des contenants, emballages, imprimés et journaux (RECYC-QUEBEC, 2022).

La LQE donne des responsabilités au gouvernement du Québec pour la gestion des MR, mais aussi aux municipalités régionales et aux municipalités locales. Les municipalités régionales sont responsables de la planification de la gestion des MR puisqu’elles doivent élaborer et maintenir en vigueur un plan de gestion des MR sur leur territoire (Bureau d’audiences publiques sur l’environnement, 2022). Cette approche a comme objectif de décentraliser la gestion des MR et faciliter le contrôle de la gestion des MR.

La majorité des pays de l’organisation de coopération et développement économique (OCDE) ont des objectifs ambitieux concernant les pourcentages de récupération des MR, dans la plupart des cas, ces objectifs sont différenciés selon des matières. Généralement, des matières comme le plastique ou le papier et carton ont des pourcentages de récupération supérieurs au reste des matières. Par exemple, les objectifs du plan d’action 2019-2024 de la politique québécoise de gestion des matières résiduelles sont spécifiquement de recycler 75% du papier, carton, verre, plastique et métal, de recycler 60% des matières organiques résiduelles et de

recycler et valoriser 70% des résidus de construction, rénovation et démolition (Ministère de l'Environnement et la lutte contre les changements climatiques, 2020). Pour atteindre les objectifs de valorisation, il y a plusieurs initiatives que les pays ont mises en place, quelques-unes à une échelle plus locale que d'autres. Au Québec, ses mesures touchent la modernisation de la gestion des matières recyclables, la réduction du plastique à usage unique, la valorisation de la matière organique, le développement des différentes filières de récupération et autres actions structurantes et l'aide aux communautés isolées (Ministère de l'Environnement et la lutte contre les changements climatiques, 2020). Ces initiatives incluent l'élargissement de la consigne ("Système modernisé de collecte sélective au Québec," 2021) et la REP (RECYC-QUEBEC, 2022).

1.3 Approche et outils pour une gestion intégrée des matières résiduelles

Une gestion intégrée des MR suivant une approche systémique basée sur le principe des 4R-VD, prend en compte des situations locales (Seadon, 2010). Les systèmes sont composés par plusieurs parties et l'amélioration de chacune des parties favorise l'amélioration du système en général.

Dans un premier temps, une approche systémique utilisée pour la gestion des MR implique l'intégration de tous les processus de la chaîne de valorisation. D'une façon générale, cette étude doit intégrer les caractéristiques territoriales du processus ainsi que leur dimension spatiale.

1.3.1 Approche systémique

L'étude du système de gestion des MR peut être vue comme la somme des parties comme la collecte, le transport, le conditionnement et la valorisation des MR, mais si on considère la MR comme une ressource, la matière qui est remplacée est aussi considérée comme partie du système (Seadon, 2010).

Ce cadre théorique systémique est la base pour l'économie circulaire qui rassemble un ensemble de stratégies contribuant toutes à un même objectif : répondre aux besoins de la société tout en préservant les ressources (Québec circulaire, 2023a). Ce modèle économique propose des stratégies qui visent à réduire la quantité de ressources vierges consommées, à intensifier l'usage des produits et à allonger la durée de vie des produits. Les douze stratégies à préconiser selon le contexte et les situations sont : l'écoconception, la consommation et l'approvisionnement responsables, l'optimisation des opérations, l'économie collaborative, la localisation, l'entretien et la réparation, le don et la revente, le reconditionnement, l'économie de fonctionnalité, l'écologie industrielle, le recyclage et le compostage, la valorisation. L'indice de circularité indique la quantité de ressources qui sont utilisées à long terme, l'indice de circularité mondial est de 7,2%, voici quelques exemples de la circularité des différents pays : en Norvège il est de 2,4%, en Suède 3,4%, au Québec de 3,5%, en Autriche de 9,7% et aux Pays-Bas de 24,5% (Québec circulaire, 2023b).

La symbiose industrielle est l'application collaborative du principe des 3RV, elle se définit comme un réseau d'organisations maillées entre elles par des échanges de matières, d'eau, d'énergie ou de ressources matérielles ou humaines (Centre de transfert technologique en écologie industrielle, 2013). Le principe de l'économie circulaire de réutiliser les ressources et d'échanger des flux de matière entre les industries peut être développé à plusieurs échelles du territoire. À l'échelle de la ville ou du quartier, l'intégration au niveau social, économique et écologique est favorisée par les industries et elle encourage l'innovation industrielle. L'application du même principe à l'échelle de la ville favorise un métabolisme urbain circulaire, où la transformation des ressources naturelles allant de la nature vers la société se fait dans un contexte de production zéro-déchet (Franco-García et al., 2019). Les principes de l'économie circulaire appliqués dans un contexte urbain favorisent à long terme un passage d'une économie linéaire vers un métabolisme circulaire urbain (La Rosa and Ramakrishna, 2021). La proximité géographique des organisations favorise la viabilité économique, la logistique et la mise en place des synergies (Centre de transfert technologique en écologie industrielle, 2013).

Plusieurs filières ont déjà entamé leur transition à travers les différentes approches, certains organismes travaillent par secteurs d'activité spécifiques pour améliorer les chaînes de valeur particulières, d'autres adoptent une approche multisectorielle, couvrant plusieurs chaînes de valeur, pour aborder des problématiques transversales. À titre d'exemple, au Québec : 41% de la nourriture est rejetée au long de la chaîne alimentaire pour un total de 3,1 millions de tonnes et près de 60% de l'énergie consommée par le secteur industriel est perdue et ne génère pas de valeur ajoutée. Quelques exemples sont montrés au Tableau 1.5.

Tableau 1.5 Exemples de projets favorisant l'économie circulaire

Filière	Organisme et Localisation	Description du projet	Référence
Industrie alimentaire	Fondation les rescapés, Montréal, Canada	Depuis sa fondation en 2017, 160 tonnes de nourriture ont été utilisées pour produire 65 000 pots de confiture et 107 tonnes de nourriture ont été redistribuées.	(Cantin, 2023)
Secteur des emballages	Entreprise PickPack, Granby, Canada	Reprise des emballages après livraison pour leur réutilisation	(Québec circulaire, 2023c)
Secteur informatique	Entreprise Splitom Energie, Montréal, Canada	Utilisation de la chaleur de serveurs informatiques pour chauffage de l'eau. La consommation électrique diminue alors jusqu'à 60% et les émissions de gaz à effet de serre diminuent jusqu'à 70%. Les serveurs sont mieux refroidis et donc plus efficaces.	(Québec circulaire, 2023d)
Agroalimentaire	Symbiose agroalimentaire Montérégie, Canada	Accompagner les organisations agroalimentaires pour la création des synergies locales. Les objectifs sont la valorisation des MR, l'approvisionnement local et combattre le gaspillage alimentaire. Depuis sa création en 2019, 315 organisations sont membres et 112 synergies ont été concrétisées, 24 448 tonnes de matière ont été détournées de l'enfouissement et 102 637 tonnes de CO ₂ équivalent ont été évitées.	(Québec circulaire, 2023e)

Filière	Organisme et Localisation	Description du projet	Référence
Agroalimentaire	Symbiose agroalimentaire Montréal, Canada	Accompagner les organisations agroalimentaires pour la création des synergies locales. Les objectifs sont la valorisation des MR, l'approvisionnement local et combattre le gaspillage alimentaire. Depuis sa création en 2019, 315 organisations sont membres et 112 synergies ont été concrétisées, 24 448 tonnes de matière ont été détournées de l'enfouissement et 102 637 tonnes de CO ₂ équivalent ont été évitées.	(Québec circulaire, 2023e)
Industrie textile	The Ontario Textile Collaborative , Canada	Étude sur les déchets textiles de post-consommation, dans la période allant de juillet 2019 à mars 2020, les résultats de 2 446 logements unifamiliaux et 35 multilogements ont été analysés. Les résultats ont démontré que 65 % des déchets peuvent être réutilisés, 21 % peuvent être recyclés et seulement 14 % ont atteint leur fin de vie.	(Weber, 2023)
Industrie textile	The Ontario Textile Collaborative , Canada	Étude sur les déchets textiles de post-consommation, dans la période allant de juillet 2019 à mars 2020, les résultats de 2 446 logements unifamiliaux et 35 multilogements ont été analysés. Les résultats ont démontré que 65 % des déchets peuvent être réutilisés, 21 % peuvent être recyclés et seulement 14 % ont atteint leur fin de vie.	(Weber, 2023)
Récupération des matériaux	AMP Robotics, USA	Développer une plateforme d'intelligence artificielle utilisant des caméras pour scanner des flux de MR et séparer les différents matériaux. Les caméras peuvent faire le tri de 80 items par minute avec une efficacité de 99%.	(Fondation Ellen MacArthur, 2021a)

Filière	Organisme et Localisation	Description du projet	Référence
Récupération des matériaux	Mazuma Mobile, Angleterre	Développer la récupération et la mise à neuf des cellulaires. Les produits sont vendus à des autres partenaires. Chaque année, la plupart de 150 000 cellulaires reçus par mois peuvent être mis à neuf et vendus.	(Fondation Ellen MacArthur, 2021b)
Récupération des MR organiques	De Clique, Pays Bas	Collecter des MR organiques comme des grains de café, des pelures d'orange et des autres MR des cafétérias des bureaux pour les transformer en matière première dans la production de l'industrie alimentaire ou cosmétique.	(Fondation Ellen MacArthur, 2021c)
Industrie textile et gestion de l'eau	Compagnie Dyecoo, Pays-Bas	Développer un procédé de teinture de textiles utilisant du CO2 gazeux comme solvant en circuit fermé, sans utiliser de l'eau. Cette technologie réduit aussi les risques associés à l'exposition de produits chimiques toxiques. Une machine de Dyecoo peut traiter 800 tonnes de polyester par année, évitant l'utilisation de 32 millions de litres d'eau et l'utilisation de 160 millions de tonnes de produits chimiques, sans émission d'effluents liquides à l'environnement.	(Fondation Ellen MacArthur, 2021d)
Gestion de l'eau	Lipor, Portugal	Gérer, récupérer et traiter l'eau usée municipale produite par 8 municipalités associées.	(Institut National d'économie circulaire, 2020)
Étude des changements climatiques	Brilliant Planet, Angleterre : projet situé au Maroc	Développer une technologie pour produire des microalgues utilisant seulement le soleil, l'eau de la mer et le vent pour cultiver des algues qui produisent des aliments riches en protéines et Oméga 3, mais aussi ils produisent des alternatives au plastique. Pour chaque tonne d'algues produite, 2,8 tonnes de CO2 sont capturées.	(Fondation Ellen MacArthur, 2021e)

Filière	Organisme et Localisation	Description du projet	Référence
Préservation de la biodiversité	Guayakí, USA/ Argentine : projet situé en Argentine, Brésil et Paraguay	Développer des partenariats avec les producteurs locaux pour produire de la yerba mate utilisant une méthode qui requière mois d'eau et aide à la régénération de la terre. Depuis ces 25 ans d'opérations, le projet Guayakí a régénéré 80 000 hectares de la forêt tropicale Sud-Américaine, planté 7 200 arbres et restauré 900 espèces. Chaque année, 972 600 millions de tonnes de CO ₂ sont séquestrées.	(Fondation Ellen MacArthur, 2021f)

Concernant la gestion des MR, si les MR intègrent d'autres cycles de matières, elles augmentent ainsi leur durée de vie et elles ne sont pas envoyées à l'enfouissement (Pires et al., 2020). Plusieurs matières et technologies peuvent être utilisées pour la valorisation de MR, par exemple, les matières organiques par digestion anaérobie permettent la génération de biométhane qui peut être utilisé comme combustible pour les véhicules de transport (Leong et al., 2021).

1.3.2 Approche territoriale liée à la collecte des matières résiduelles

La théorie constructale permet de créer une structure hiérarchique pour générer la structure de collecte et de transport qui permet de diminuer la dépense d'énergie (Zhou et al., 2007). Cette théorie est basée sur le fait que le flux dans une surface peut être considéré comme la somme de flux dans cette surface (Ghodoossi and Eğrican, 2003). Le principe de la structure hiérarchique est généralement utilisé aux systèmes de transport urbain pour diminuer leur impact environnemental (Cheng et al., 2016). La théorie constructale a été appliquée à la conception de véhicules (Bejan and Lorente, 2009) où les auteurs expliquent lorsque chaque composé du véhicule est conçu de manière indépendante, une version du véhicule d'une taille plus grande est meilleure. Cependant, la conception intégrée de la gestion des MR touche le processus au complet et cela prend en compte qu'un véhicule plus large entraîne une pénalité concernant la consommation de combustible qui est proportionnelle à son poids (Bejan and

Lorente, 2009). Cela se traduit par le fait que toute masse du véhicule a une taille optimale associée et, selon les auteurs, la loi découlant de la théorie constructale permet de prendre en compte les différents enjeux associés au processus. La problématique est de générer des systèmes énergétiques connectés de façon avantageuse pour le processus au complet et non seulement pour une partie du processus (Trancossi, 2016). Inspirée par cette approche, la théorie constructale est construite du plus petit au plus large et la structure hiérarchique est appliquée à la collecte et au transport pour analyser le processus du transport.

La théorie fractale tant qu'à elle, part du plus large vers le plus petit et cette théorie est utilisée dans les transports pour la livraison dans les centres urbains. Pour les enjeux de logistique dans les villes, les colis à livrer arrivent à des centres de logistique dans des véhicules plus grands que les véhicules qui font la livraison des colis du centre de logistique vers les adresses de livraison en milieu urbain (Rao et al., 2015).

Pour le transport des MR jusqu'au centre de valorisation, plusieurs méthodes de transport sont envisageables, mais la consommation énergétique est différente ainsi que les émissions de GES. Les résultats estimés concernant les facteurs d'émissions de chaque mode de transport sont présentés au Tableau 1.6 (Béland and Zamboni, 2023).

Tableau 1.6 Facteurs d'émission selon les différentes méthodes de transport
tiré de Béland and Zamboni (2023, p.5)

Méthode de transport	Facteur d'émission (gCO₂éq/tonne.km)	Facteur multiplicatif
Bateau	Entre 5 et 31	1
Train	22	Entre 2 et 3
Routier	62	Entre 8 et 9
Avion	Entre 547 et 973	Entre 68 et 70

Les paramètres de collecte et transport des MR, les structures de transport doivent être ajustés selon les aspects territoriaux de villes, mais aussi la distribution de la population (Tanguy et al., 2016). La situation actuelle plus courante dans la plupart des villes est la collecte porte-à-porte utilisant la même méthode de transport, mais cette situation crée beaucoup de bruit et inconvénients pour la circulation urbaine.

Il y a 5 méthodes de collecte des MR qui sont les plus populaires : la collecte porte-à-porte, la collecte dans les allées ou ruelles, le déversement des déchets à un endroit désigné, l'intrusion de la propriété et la collecte pneumatique (Farré et al., 2023). Chaque type de collecte dépend des situations spécifiques de chaque territoire. Pour le transport des MR du centre de transfert au centre de valorisation, différentes méthodes de transport sont envisageables. Le Tableau 1.6, décrit les facteurs d'émission de CO₂ des différentes méthodes de transport.

Dans l'inventaire québécois, le secteur des MR exclut les émissions issues de la collecte et du transport des MR ainsi que les émissions associées à la consommation de combustibles fossiles dans les lieux d'élimination ou de traitement des MR. Ils sont aussi exclus, la réduction ou l'évitement d'émissions pouvant découler de la valorisation des biogaz captés lorsqu'ils se substituent à des combustibles fossiles (Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 2022).

Une analyse plus fine montre que les impacts du transport des MR pour la valorisation et la consommation d'énergies fossiles ont plus d'impacts que prévu et doivent être étudiés selon le cas particulier.

1.3.3 Dimension spatiale pour la gestion des matières résiduelles

Le système de gestion intégré des MR est lié à la distance à parcourir, donc il est aussi lié au territoire. Avec les premiers modèles de gestion des MR, le territoire est réduit à un système de points et le territoire à une distance. La supposition que les zones urbaines sont homogènes ne permet pas d'étudier les détails de l'effet de l'urbanisation par rapport aux enjeux

environnementaux (Liu et al., 2017). De plus, la réglementation et la valorisation des MR ont mis en valeur l'influence de la qualité et la quantité des MR récupérées (Larsen et al., 2009b).

Le modèle utilisé lors de la collecte et le transport des MR est essentiel pour évaluer l'énergie dépensée dans le processus. Plusieurs modèles sont utilisés pour les calculs de collecte et de transport : le premier modèle est un modèle omettant les caractéristiques territoriales, le deuxième modèle est utilisé quand le système de routes est traité comme un système de type grille (Sliz-Szkliniarz and Vogt, 2012) et le troisième modèle est un modèle discret qui utilise des systèmes d'intégration géographique (SIG) permettant d'analyser les informations routières (Tatsiopoulos and Tolis, 2003). Le facteur de tortuosité (τ) considère que les routes du territoire de collecte ne sont pas des lignes droites (Pantaleo et al., 2013). Dans le premier et deuxième type de modèles, la valeur de τ est calculée sur une base théorique et sans une évaluation du système routier. Tandis que dans le troisième modèle, le système routier est analysé par des ordinateurs et le système de grilles est modifié en continu par des modèles mathématiques (Pantaleo et al., 2013).

Les MR collectées dans le territoire sont stockées généralement dans les centres de transfert pour leur tri et classification, en attente d'être envoyées pour leur valorisation (Larsen et al., 2009a). Pour les matières recyclables, un centre de tri peut aussi être présent dans la chaîne globale de valorisation, les centres de tri et les centres de transfert peuvent être présents, mais dépendant des caractéristiques du territoire ils peuvent ne pas être nécessaires.

Généralement, les distances réelles de collecte et transport entre le territoire et le centre de transfert ou centre de valorisation sont utilisées pour calculer l'énergie dépensée dans la gestion des matières résiduelles (Quintili and Castellani, 2020).

Dans une perspective systémique, si les quantités de matières résiduelles collectées sont trop faibles ou si les distances parcourues par le transport sont trop grandes, les bénéfices énergétiques de la valorisation ne seront pas suffisants pour que la technique de valorisation soit énergétiquement intéressante (Louati et al., 2019). Les caractéristiques du territoire et les

différentes densités de population du territoire urbain facilitent l'utilisation de plusieurs autres types de transport qui permettraient un avantage du point de vue environnemental en plus de l'avantage économique. Ces véhicules pourront être de plus petite taille avec une plus petite charge utile, et dans une zone densément peuplée, ils pourront être remplis plus rapidement.

Une façon de prendre en compte la différence de densité de population et au niveau spatial, est de découper le territoire en plus petites parties (Pantaleo et al., 2013). Ce découpage peut être fait par province, municipalité ou zone d'influence qui utilisent le même centre de transfert ou valorisation.

CHAPITRE 2

PRÉSENTATION DU PROJET DE RECHERCHE

Les hypothèses de travail de ce projet de recherche sont les suivantes : les méthodes et pratiques de la gestion des MR ne sont pas adaptées ni aux densités de population ni aux caractéristiques territoriales de chaque ville ou municipalité. Alors, il devient pertinent de définir des méthodes de collecte et transport qui assurent des bénéfices énergétiques lors de la gestion et de la valorisation des MR. Ainsi, il s'agit d'étudier les méthodes et pratiques de collecte et transport des MR en milieu urbain dans un contexte territorial pour pouvoir augmenter leur performance (axe territorial). D'autre part, il s'agit de planifier l'utilisation des MR pour la chaîne globale de valorisation incluant ainsi l'aspect technologique de la valorisation (axe technologique). Les hypothèses et les objectifs de recherche de ce projet sont définis et présentés dans ce chapitre.

2.1 Hypothèses de recherche

Les deux axes de recherche identifiés sont explorés par trois volets qui contribuent à poser un regard systémique sur la gestion intégrée des MR. La dimension énergétique est placée au cœur de la construction du projet de recherche (Kumar and Samadder, 2020), considérant que la configuration du système de collecte et transport des MR peut avoir des répercussions sur la performance énergétique de la chaîne de valorisation des MR (Bavaghar Zaeimi and Abbas Rassafi, 2021).

Volet 1 – Hiérarchisation du système de collecte et transport

Dans ce premier volet, il s'agit d'étudier la collecte et le transport des MR dans un contexte urbain comme partie de la chaîne globale de valorisation des MR. Le système de collecte et transport peut être vu comme un système de transport de marchandises, la génération de ces marchandises est liée aux densités de population et des routes dans le territoire (Rao et al., 2015).

L'étude de la gestion des MR est généralement basée sur des choix opérationnels comme la méthode de transport ou le type de carburant pour le camion utilisé lors de la collecte (Chester and Horvath, 2009), le type de chargement du camion (Rose et al., 2013) ou les émissions atmosphériques (Maimoun et al., 2013). Le système de gestion des déchets peut bénéficier de l'utilisation de différentes méthodes de transport qui doivent tenir compte des caractéristiques du territoire et de la densité de population (Anderluh et al., 2017). Il a été établi que la collecte et le transport des déchets sont reliés aux paramètres de la génération de déchets dans le territoire, donc les structures de transport ont besoin d'être ajustées aux caractéristiques et à la distribution de population de la ville (Tanguy et al., 2016). La situation plus courante dans la plupart des villes est actuellement la collecte porte-à-porte utilisant la même méthode de transport, créant par la même occasion beaucoup de bruit et d'inconvénients pour la circulation urbaine. Ces constats amènent à formuler la première hypothèse de ce projet de recherche.

Hypothèse 1 :

Une collecte de MR hiérarchisée par niveaux et utilisant différents modes de transport disponibles est énergétiquement plus efficiente qu'une collecte porte-à-porte utilisant un niveau unique de collecte.

Volet 2 – Bénéfices énergétiques de la valorisation des MR

Les caractéristiques territoriales telles que la densité de population et la densité routière des territoires influencent les performances de récupération de MR (Tanguy et al., 2016). Ainsi les quantités collectées des différentes filières influencent la performance énergétique de la valorisation tenant compte l'aspect technologique de la valorisation (Sarker et al., 2019). Alors, l'étude du bilan énergétique de la chaîne globale de valorisation conduit à la formulation de la deuxième hypothèse.

Hypothèse 2 :

Considérant les dépenses énergétiques, lors de la collecte et du transport des MR et les gains d'énergie lors de la valorisation, le bilan d'énergie permet d'établir les conditions territoriales pour lesquelles la valorisation est énergétiquement bénéfique.

Volet 3 – Aide à la planification spatiale de la valorisation des MR

Les deux premiers volets placent les caractéristiques territoriales au cœur des préoccupations de l'analyse des performances de chaîne globale de la valorisation. Ce troisième volet entend intégrer l'aspect territorial et l'aspect technologique au bilan énergétique de la chaîne globale de valorisation. Différents niveaux de collecte et transport des MR sont définis dans le territoire et l'utilisation des stations de transfert dans le territoire fait partie de la méthode de conception de l'outil développé (Dongqing et al., 2022). Cette approche permet d'analyser les gains énergétiques de la valorisation des matières organiques quand on considère aussi l'énergie dépensée pour leur transport à l'extérieur du territoire. Par ailleurs, les caractéristiques territoriales liées au transport et aux gisements de MR sont considérées pour étudier l'allocation des MR. À partir de ces constats, une troisième hypothèse est formulée.

Hypothèse 3 :

Le développement d'un outil basé sur le bilan énergétique de la chaîne globale de valorisation permet de planifier la localisation des centres de valorisation pour diminuer les pertes énergétiques.

2.2 Objectifs généraux et spécifiques

L'objectif général du travail de recherche est de développer un outil d'aide à la décision reposant sur le bilan énergétique de la chaîne globale de valorisation des MR permettant d'établir les paramètres territoriaux et de transport pour lesquelles la valorisation est énergétiquement favorable. Le modèle considère la chaîne globale de gestion des MR basée sur le bilan énergétique pour le transport et la valeur moyenne territoriale pour la valorisation,

se détachant ainsi du facteur technologique. Cet objectif général se décline en trois objectifs spécifiques, répondant aux trois hypothèses. Le premier concerne le développement d'un cadre d'analyse.

Objectif 1 :

Analyser l'utilisation d'une structure de collecte et de transport hiérarchisée incluant plusieurs technologies et capacités de chargement pour diminuer les dépenses d'énergie pour la collecte et le transport des MR.

Le second objectif vise à inclure les revenus énergétiques de la valorisation des MR dans le processus d'évaluation. Les aspects territoriaux influencent les gisements et les quantités de MR à valoriser, qui ont un effet sur le bilan énergétique de la chaîne de valorisation.

Objectif 2 :

Développer un modèle basé sur le bilan énergétique associé à la valorisation des MR afin de déterminer les zones du territoire pour lesquelles la valorisation est énergétiquement favorable.

Dans le prolongement de l'objectif 2, le troisième objectif permet de planifier la localisation des digesteurs pour diminuer les pertes énergétiques lors du transport des MR quand la valorisation se fait à l'extérieur du territoire.

Objectif 3 :

Développer un outil pour étudier la localisation du digesteur considérant les pertes d'énergie dans le transport des MR du centre de transfert jusqu'au digesteur.

La construction du projet de recherche est synthétisée sur la Figure 2.1, qui reprend les principaux éléments de l'état des connaissances ainsi que les lacunes identifiées sur lesquelles s'appuie le travail de recherche.

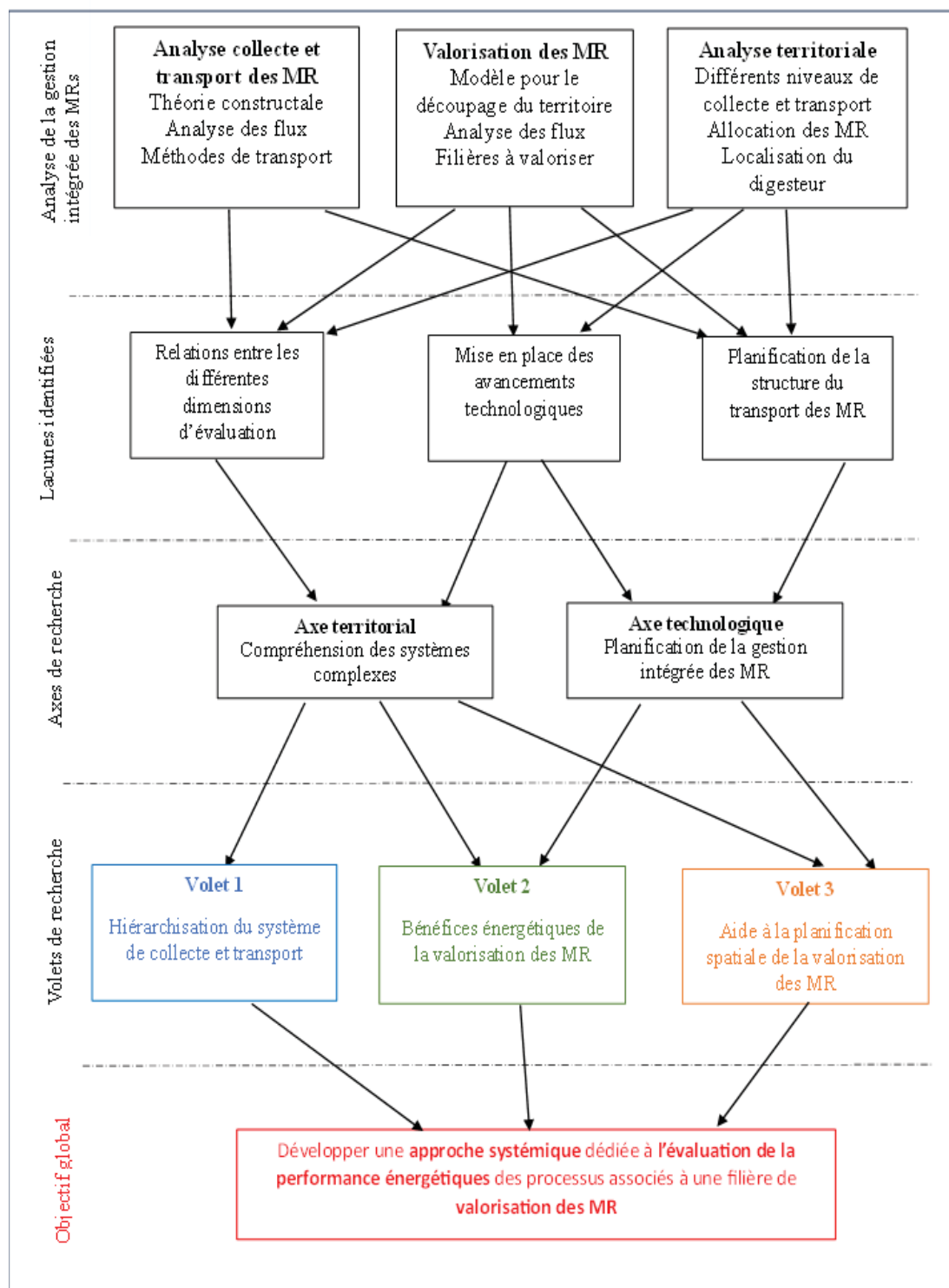


Figure 2.1 Présentation du projet de recherche

Dans les prochains chapitres, on présente les articles publiés qui représentent les objectifs spécifiques de ce projet de recherche. Le chapitre 3 présente le premier article et il analyse la hiérarchisation des méthodes de collecte et de transport. Ensuite, le chapitre 4 présente le deuxième article et il étudie les paramètres du territoire où la valorisation est énergétiquement favorable. Et finalement, le chapitre 5 présente le troisième article et il analyse les combinaisons de conditions territoriales et des méthodes de transport considérant différents niveaux de transport pour que le bilan énergétique de la chaîne globale de valorisation soit énergétiquement favorable.

CHAPITRE 3

DESIGN OF MATERIAL TRANSPORTATION SYSTEMS FOR SUSTAINABILITY

Rosario Corbo ^a, Mathias Glaus ^b

^{a,b} Département de Génie de la construction, École de Technologie Supérieure
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article publié dans 'Transportation Research Part D',
octobre 2019

3.1 Abstract

Moving towards sustainability implies a social challenge that entails urban planning and the environmental impact of the transport of waste management. Previous studies assume the use of a unique vehicle, but in this study; many levels of transportation are examined with different transportation methods at each level, allowing the use of greener and smaller transportation methods in urban centres. In this article, the comparison between the use of a unique vehicle and the use of a hierarchical structure for the collection and transportation is analyzed. In the first level of the transportation structure, the transportation method is, a human activity such as walking and carrying 10 kg, in the second level the transportation method was a bicycle carrying 100 kg and for the third and fourth levels the use of motorized vehicles carrying 1 and 10 tons of material. Results support the hierarchical structure with multiple levels and transportation methods to reduce energy consumption, over the most common use of a single level of transportation. The results show that population density has a significant association with reduced transport energy. Results also demonstrate that the loading ratio of each transportation method, the number of stops in each level and the energy spent per stop also affect the transport structure. To demonstrate the applicability of the proposed framework, this paper focuses on a real-life case study of the waste management system in Montreal, Canada. This approach provides insights for city planners or policy-makers regarding flow structures and methods to transportation.

3.2 Introduction

Sustainability is considered as the interaction of the pillars of environment, economy, and society. Moving towards sustainability implies a social challenge of searching for the change of the status quo. Transportation is a growing problem, causing greenhouse gases, the ozone layer depletion and atmospheric pollution; many mitigation options are available in order to tackle transportation in the city's territory. Waste generation in cities is a growing problem and city planners need to develop waste management systems for cities that are constantly evolving. Urban waste management is becoming one of the most relevant issues in modern society associated with the growing concern for environmental preservation, urban planning and pollution control. The study of the waste management system is usually based on operational choices like transportation mode or the fuel of the trucks used for waste collection (Chester and Horvath, 2009), the type of loading (Rose et al., 2013) or the emissions released (Maimoun et al., 2013). The waste management system could benefit from the use of different transportation methods accounting for the territory morphology and density of the population (Anderluh et al., 2017). It has been established that waste collection and transportation are related to the parameters of waste generation in the territory, so transportation structures need to be adjusted to the city's structures and population distribution's (Tanguy et al., 2016). Usually, the current situation in most cities is the curbside waste collection using the same transportation method and this situation is creating much noise and traffic inconvenience. In this paper, different transportation methods are used for the transportation of materials considering the differences in urban forms where there are particular needs and constraints for transportation.

Homogenous urban form across different areas of the city fails to provide details to study the effects of urbanization on the environment (Liu et al., 2017). The novelty of this paper is that different transportation methods and differences in urban area are considered in order to shed light on the impacts of the transportation of materials on the urban environment when moving towards sustainability. The basis for this paper is the constructal theory that states that the flow

in a surface can be studied as the sum of the flow at an elemental level (Ghodoossi and Eğrican, 2003) where the defined area is composed of a finite number of small elemental areas. To account for the differences in the city's territory, this article focus on the collection of the same quantity of materials but dividing this mass using different transportation methods and different hierarchical levels of transportation. The advantage of using this method for the transportation of materials is mainly due to the fact that the flow of the materials is divided into different zones using different transportation methods and so, smaller eco-friendly vehicles can be used in urban settings (Schliwa et al., 2015) to diminish the environmental impact of the process. The constructal theory is applied to the transport of materials (Chen, 2012) without considering the difference in urban density. The principle of hierarchical structures is usually applied to urban transit systems to reduce the environmental impact (Cheng et al., 2016); in this case, this theory is applied to the waste management system for a greener city. To demonstrate the viability of this approach and to eliminate the inconveniences of the use of big garbage trucks, the waste generation data from the city of Montréal, Canada in 2016 (Service de l'Environnement de la ville de Montreal, 2017) is used to calculate the waste density of different types of neighborhoods.

This represents an opportunity for the waste management sector to improve this process, to create a greener city, to consume less energy and to adapt the transportation method used according to the distance travelled, the quantity of material transported and the territory's characteristics.

This paper is structured as follows. First, the related literature is mentioned explaining the constructal theory and its application in material transportation. Second, the data and the methodology are presented. Third, the results are given, forth they are discussed and finally, the conclusions are offered.

3.3 Literature review

In this paper, the principles of the constructal theory are used to evaluate the energy performance of the collection and transportation. The mathematical principle of the constructal theory is the minimization of total transport costs associated with a stream generated in a given region and transported to a point(Zhou et al., 2007).

3.3.1 Hierarchical structure and constructal theory

It has been demonstrated that the constructal theory is the best way to optimize the efficiency of the flow from a surface to a point by minimizing the resistance in the system(Bejan, 1997). Later (Ghodoossi and Egrican, 2003) reached the same conclusion for economics, transport of goods and fluid flows and (Kuddusi and Egrican, 2008) proposed a review of constructal applications. The review supported the previous findings of increasing efficiency of the natural surface to point flows in the form of a tree network but only when considering the physical constraints of the flow. So, increasing the complexity or branching of the system is not always the best solution, there is a balance between the complexity of the constructal or hierarchical structure and its spatial constraints. When the structure ignores the spatial constraints, the efficiency of the process increases and this principle is used for the urban planning and waste collection and transportation.

The basis of the constructal theory is the geometric optimization of configurations represented in Figure 3.1 and it demonstrates that the cost minimization can be achieved by optimizing the area and the structure of the flow in that area (Bejan et al., 2000).

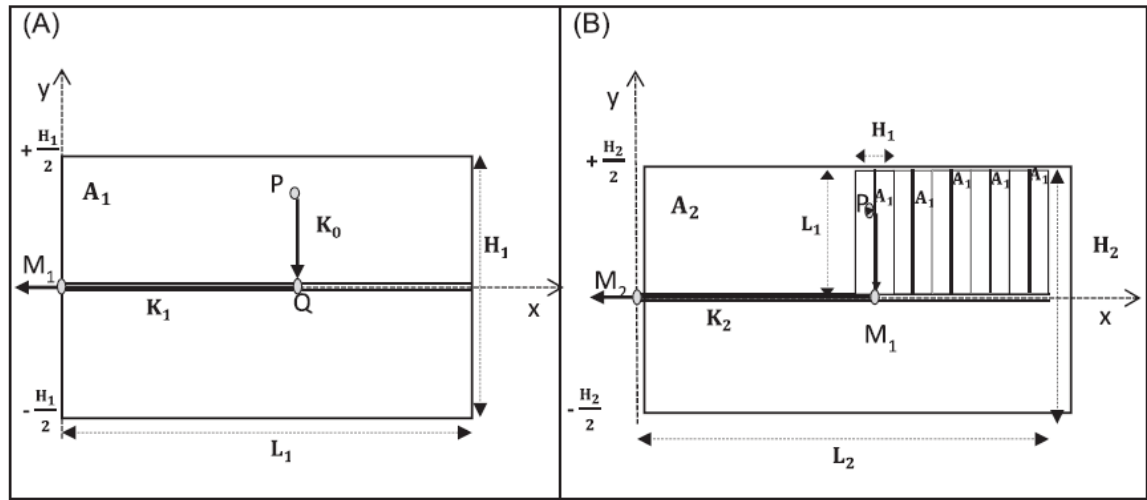


Figure 3.1(A) Representation of the elemental level of the constructal theory and (B) the construction of the second level adapted from Bejan et al. (2000, p. 1432)

The total stream of goods is represented by (3.1).

$$m = \gamma A \quad (3.1)$$

Where

m represents the total mass of the flow

γ represents the density of mass per unit of area

A represents the area of the flow

The cost of transporting the total stream between the area A_1 and the point M_1 , in the elemental level is represented by (3.2).

$$C_1 = 2 \gamma \int_0^{\frac{H_1}{2}} \int_0^{L_1} (K_0 x + K_1 y) dx dy \quad (3.2)$$

where

C_1 represents the cost of the process

H_1 represents the width of the elemental level

$H \frac{1}{2}$ represents the width of the half of the elemental level

L_1 represents the length of the elemental level

γ represents the density of mass per area

K_0 and K_1 represents the cost per unit of goods transported and per unit of distance travelled

The characteristics of the formation of the second level are represented by (3.3) and (3.4) where the areas of the first and second levels are connected:

$$A_2 = n_2 \times A_1 = H_2 \times L_2 \quad (3.3)$$

where n_2 represents the number of elemental levels unites to form the second level

$$H_2 = 2 \times L_1 \quad (3.4)$$

3.3.2 Constructal theory applied to material collection and transportation

The (3.5) represents the generalized case equation in this paper for the collection and transportation.

$$C_i = 2 \gamma \int_0^{H_i \frac{1}{2}} \int_0^{L_i} (K_{i-1}x + K_i y) dx dy \quad (3.5)$$

The fractal theory designs structures from large to small flows and this theory is used in transportation of delivery in urban centres. In city logistic, the parcels arrive to the city to the logistic centres in a larger vehicle than the one that delivers the parcel from the logistic centre to the destination address (Rao et al., 2015). Inspired by this approach, the constructal theory designs from small to large and the hierarchical structure is applied to the city's material collection and transportation to move towards sustainability in transportation.

The constructal theory has been applied to the design of vehicles (Bejan and Lorente, 2009) where the authors explain that when a component is designed alone, a larger size vehicle is better. Although integrative design is about the entire process and this accounts for the fact that a larger component induces a fuel penalty that is proportional to its weight. That implies that any carried mass has a certain optimum size associated vehicle and according to the authors this constructal-law tendency is key to sustainable development. The challenge is to generate energy systems in which the flow structures allocated to different areas are connected in ways that would benefit the entire process.

The novelty of using this theory applied to the design of the transport structure is (1) the creation of different levels of collection, (2) the transportation methods can be adapted to the characteristics of the territory and (3) the transport structure can be adjusted when new and less costly transportation methods become available.

The constructal theory has been applied to the study of the transport modes and the exergetic material input per unit of service accounts for the amount of resources extracted to provide the transport service (Trancossi, 2016). The purpose of this paper is to analyze the benefits of using the hierarchical structure in the collection and transportation of waste and not to compare or decide the best available technology, where the hierarchical structure is the combination of many transport modes. In this study, the hierarchical levels are created using plausible transport methods that could be available in any city for the waste management without considering minor improvements on the available technologies.

The energy cost of waste collection and transportation is usually measured using the greenhouse gases emissions produced, the total energy consumed or the exergetic disruption but in this study, the energy is evaluated as the energy cost of moving the transportation methods. The first and second level of the structure presented in this paper use the human power for the collection where the energy of the task is calculated using the metabolic equivalent (MET) that represents the intensity with which a task is forcing the metabolism to consume energy. A bigger MET value represents that a task is more energy consuming than

another with a smaller MET associated value and it has been defined that 1 MET is the rate of energy consumed per surface area unit of an average person seated at rest, it represents 1.162 W/kg (Young, 2009). As expressed in (3.6), the value of MET for the transport allows energy expenditure to be calculated with only one known variable: the mass being transported.

$$C = \int_0^{H_i} \int_0^{L_i} MET(x + y) dx dy \quad (3.6)$$

The value of MET represents how performing this task separates the metabolism from being at rest and this is used as an indicator of energy expenditure.

3.4 Data and methodology

To study the energy cost of waste collection and transportation, four different levels with different transportation methods are created. In both cases, each household generates m_0 and leaves it for curbside collection, but the total distance of the collection route is divided in hierarchical levels creating different scenarios. For all scenarios, the comparison of the collection and transport structures is based on a total mass of collection of 10 tons.

3.4.1 Analysis of different structures

The transportation methods chosen for this study are some of the plausible transportation methods for the collection and transport in an urban centre with the geographical structure of the city of Montréal.

In Figure 3.2, the conventional scenario is represented as the usual curbside collection, where the household waste is placed on the curbside and then a unique garbage truck with a payload of 10 tons, proceeds to the collection and transportation of it.

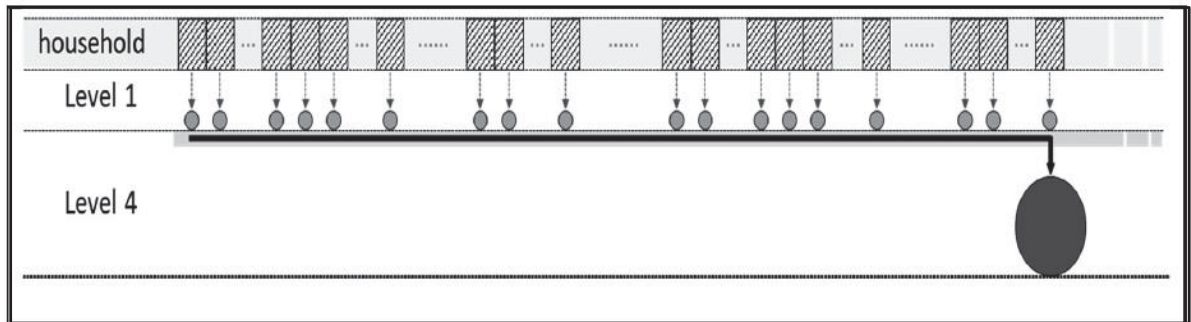


Figure 3.2 Conventional scenario, curbside collection the only transportation method used is the utility truck

In Figure 3.3 , different levels of transportation are created in order to compare the energy cost of different combinations of levels in the transport structure.

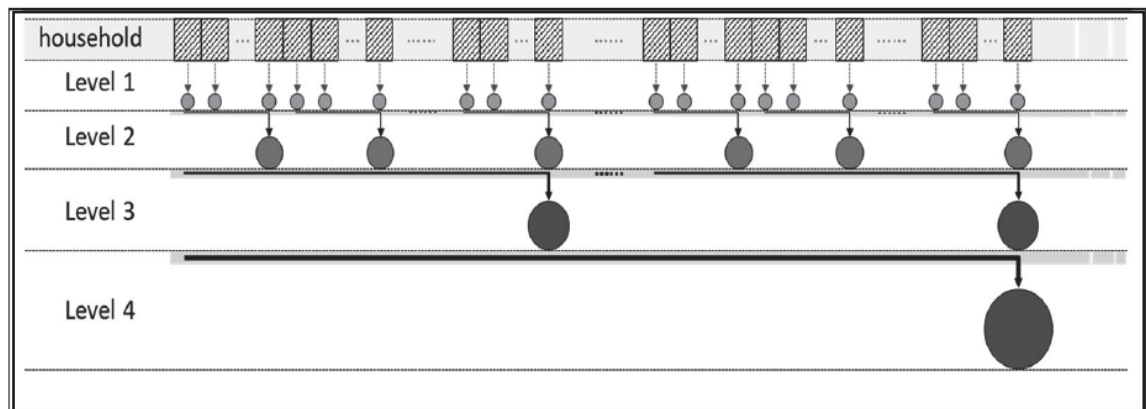


Figure 3.3 Description of different hierarchical levels created for the collection.

A smaller mass is collected in the lower hierarchical level with a less energy-consuming transportation method. The waste generated by each household is m_0 and in level 1 the transportation method picks up m_0 up to m_1 , and then m_1 is left for pick up. In level 2, the transportation method picks up m_1 up to m_2 , and left for pick up. The same is done in level 3 and level 4 and then m_4 is transported to the final destination, the details of these scenarios are presented in Tableau 3.1.

Tableau 3.1 Description of the different scenarios created for the study

Scenarios	Number of levels	Transportation method used	Levels included
A	2	walk + utility truck	1 + 4
B	3	Walk + bike + utility truck	1 + 2 + 4
C	3	Walk + pickup truck + utility truck	1 + 3 + 4
D	4	Walk + bike + pickup truck + utility truck	1 + 2 + 3 + 4

In Tableau 3.2 and Tableau 3.1, the transportation methods used in each scenario are presented.

Tableau 3.2 Description of levels and payload used per level

level	Transportation method	representation	Maximum transported mass (kg)
1	Human power, walking	$m_1 = N_1 * m_0$	10
2	Human power, biking	$m_2 = N_2 * m_1$	100
3	Engine power, pickup truck	$m_3 = N_3 * m_2$	1000
4	Engine power, utility truck	$m_4 = N_4 * m_3$	10000

Where N_i is the number of stops of the transportation method in that specific level.

Inspired by the manufacturing industry where the use of carts is a common practice for the loading tasks (Varcin et al., 2015): at level 1, the transportation method used is the human power by walking, this is the simplest transportation method available where the person is carrying the material to the next location. To move towards sustainability and tackle the environmental impact of a growing population and waste generation, urban citizens should walk and carry 10 kg of waste materials that represents less than a minute for the average neighborhood. In order to improve the efficiency of the process, the use of a bicycle as transportation method has been proven as a very effective tool (Gruber et al., 2014). Moreover,

in many inner cities, the use of cargo bikes is studied in order to facilitate mobility around the urban core of the city (Melo and Baptista, 2017), in particular the use of a cargo bike as a greener transportation method is well suited for the urban transport (Riggs, 2016). So in level 2, the transportation method used is the human power by biking where a cargo bike is used for the transportation of materials, urban citizens should carry on the cargo bike 100 kg of waste materials representing less than 3 min for the average neighborhood. For the transportation in level 3 and level 4, an engine powered transport is used like the pickup truck in level 3 and the utility truck in level 4 without considering the differences created by the containers of the trucks, the way of choosing their routes or the type of fuel of the fleet. The benefits of using a hierarchical structure are studied by ignoring the differences of available technologies for the transport modes.

3.4.2 Calculations for human transportation method

It has been proven that the optimal speed of walking corresponds to the self-selected speed and for unloaded walking or with loads of fewer than 20% of body weight, that speed is 1.4 m/s (Pamukoff et al., 2016). Walking at changing speeds, stopping and engaging when walking have an energetic cost between 6 and 20% higher than walking at a constant speed (Seethapathi and Srinivasan, 2015). The biarticular muscles in the human leg allow the knee and the ankle to work in sync and to store the power for the next push-off of the ankle when riding a bicycle and in this case, the cost of stopping and increasing the speed is considered to be 20% (Junius et al., 2017). From an energy point of view, on level ground, walking is more expensive than using a bike in the high-speed range, because the human body is designed for walking and not for moving at high speed. The human muscles consume energy when moving the legs and arms like a pendulum and when stopping and putting the foot down for each stride (Gruber et al., 2014). Therefore, by not stretching the muscles completely when pedalling and by preventing vertical movement of the centre of mass, the use of a bicycle improves the muscle's efficiency.

The parameters used for the calculations when using human powered transportation methods are detailed in Tableau 3.3.

Tableau 3.3 Parameters of the human transportation method for the collection in levels 1 and 2

Transportation method	Speed (km/h)	MET (W/kg)	Represented activity	Lost stopping (%)
Walking	4.68	3.49	Walk (Gunn, et al., 2004)	13
Biking	10.00	5.81	Cycling (Ainsworth, et al., 2011)	20

3.4.3 Calculations for power engine vehicles

The speed and fuel efficiency of a truck are different considering the stages of the collection and transportation, and the geographical characteristics of the territory influence their energy consumption (Nguyen and Wilson, 2010). Considering different municipalities, there are different types of trucks used for the collection and transportation with different payloads (Pérez et al., 2017).

There are studies of the fuel consumption of garbage trucks to evaluate the differences of energy consumption (Sandhu et al., 2015), but the purpose of this study is to evaluate the benefits of the use of the hierarchical structure using different transportation methods and without considering the technology used. In this case, the powered engines considered are the pickup truck with a payload of 1000 kg and the utility truck with a payload of 10,000 kg (Delorme et al., 2010). The losses of energy in a heavy truck are between 15% and 20% in urban scenarios and between 0 and 2% on the highway (National Research Council, 2010), so in this study the losses of energy are considered 18%.

For levels 3 and 4, the speed used by trucks in the collection mode is 16 km/h (Sandhu et al., 2015) and the energy cost is calculated using available data of consumption for American truck industry (National Research Council, 2010).

3.4.4 Energy costs and time of the transport structures

In the hierarchical structure there are different levels of collection so the total energy consumed per scenario is the sum of each level in the scenario described (3.7). In this study, the value of the load transported is considered as the middle point of the complete payload of it. To study and compare the energy consumption in the process, the primary energy is used for all transportation methods. For each level, the total energy cost is calculated as the addition of the transportation method's energy and the energy spent during the stop when picking up the material as represented in (3.7). By the same token, the total time elapsed in the process is calculated as the time spent for the transportation plus the time of each stop and collection as shown in (3.8).

$$E_{total,i} = N_i \times [E_{segTrans,i} + E_{stop,i}] \quad (3.7)$$

$$Time_{total,i} = Time_{techno,i,10tons} + N_i \times Time_{stop,i} \quad (3.8)$$

Where

$E_{segTrans,i}$ represents the average value of the energy spend in level i.

$E_{stop,i}$ represents the value of the energy spend per stop in level i.

$Time_{techno,i,10tons}$ is the time of collection in level i to collect 10 tons.

$Time_{stop,i}$ is the time elapsed per stop in level i.

N_i represents the number of stops in level i.

The collection of the material left at each stop is collected by a unique person, the mechanization of this task is not considered because the purpose of this study is to prove the benefits of using the hierarchical structure for the collection of materials. The energy spent at stop, i $E_{stop,i}$, is calculated by using the value of 3 MET, that is the value of making a moderate effort (Kuwahara et al., 2016) and considering that only one person is performing this task. The time of each stop is calculated using the data of the municipality (Davis and Cornwell, 2008).

As in many cities, the curbside collection is the method used in the city of Montreal. The data of the city (Service de l'Environnement de la ville de Montreal, 2017) is used to study the impact of urbanization level on the transportation of materials; the city's territory is divided in different types of neighborhoods: suburban, urban and midtown areas. Using the number of residential houses and travelled distance for waste pickup in these neighborhoods in the city of Montreal, the waste generation density is calculated: 0.21, 1.16 and 1.82 tons/km. The mass of waste generated per person and per week is represented as m_0 and this mass in the city of Montreal is 3.5 kg. All the masses presented in this article are based on the collection per week and per person.

This method can be applied to any city using the data of waste collection of this particular city and using the energy associated with different transportation methods and different loading masses.

3.5 Results

The goal of this section is to study the impact of different transport structures in the energy cost of transportation of materials. These results may provide insight for city planners or policy-makers regarding the relationship between flow structures and transportation methods.

3.5.1 Comparison of structures

For different types of neighborhoods, the waste generation is different and that implies that in order to collect 10 tons of waste, the distance travelled also change. In a suburban neighborhood, the distance travelled is 48.00 km, in the urban neighborhood, it is 8.62 km and in midtown, it is 5.50 km.

To compare these different scenarios, the indicator R_i is introduced as defined by (3.9).

$$R_i = \frac{E_i}{E_D} \quad (3.9)$$

Where

E_i is the energy cost using the structure of scenario i.

E_D is the energy cost using the structure of scenario D that is used as a reference for the study.

The energy spent in the collection and transportation diminish with the density population of the studied territory, as seen in Figure 3.4.

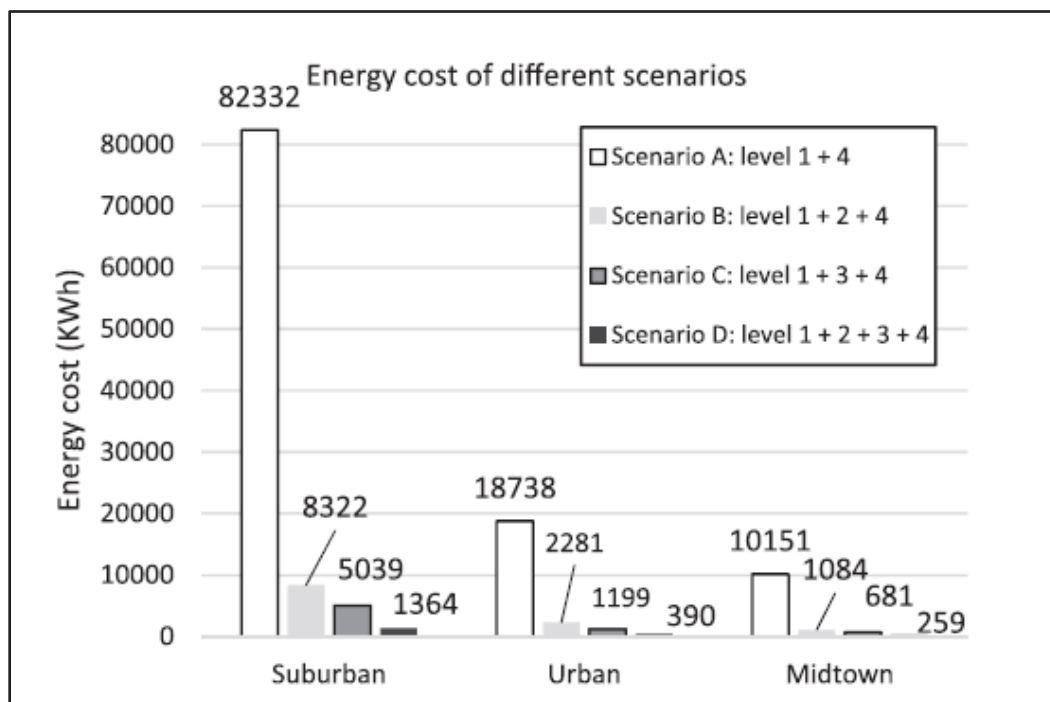


Figure 3.4 Energy costs of different scenarios for the different population areas

For each scenario and density, the energy cost of the considered scenario is R_i times bigger than the energy cost of scenario D for the collection of 10 tons.

The results presented in Tableau 3.4, show that the value of the ratio R_i is superior to one for all the scenarios, when considering the conditions of the study.

Tableau 3.4 Results of values of the ratio R_i and the changes of this ratio for different scenarios

Neighborhood type	Scenario A		Scenario B		Scenario C	
	R_A	Change (%)	R_B	Change (%)	R_C	Change (%)
Suburban	60		6.1		3.7	
Urban	48	20	5.9	3.3	3.1	16
Midtown	39	19	4.2	29	2.6	16

The results indicate that the use of the constructal theory for the design of the waste collection and transport structure is always energetically beneficial when using the combination of transportation methods used in this study. The difference of energy costs between the different scenarios and scenario D decreased with the density of population and generation of waste. With R_A ranging from 8.21 to 9.89 times higher than R_B and R_B being from 1.59 to 1.90 times higher than R_C . So the structure of scenario C is more energy convenient than the scenario B and scenario B is more convenient than scenario A. That suggests that for this particular combination of transportation methods and for a collection of 10 tons of waste, from an energy standpoint it's suitable to divide the collection and transportation in a bigger number of levels using the transportation methods considered in this study. Furthermore, the energy cost diminishes when the density of the population of the territory increases and these results are observed for each scenario in the conditions of the study.

The change of R_i demonstrate that the ratio between scenarios is not the same when considering different urban structure. These suggest that the energy for each scenario is sensitive to the energy lost when stopping, especially to the number of stops per level.

Moreover, the number of stops depends implicitly on the transportation method chosen because each transport method has an associated maximum payload.

3.5.2 Improvement of transportation method

This analysis aims to evaluate the influence of the loading mass of the transportation method on the energy cost of the developed structure and the transportation method used in order to improve the process. For this analysis the three structures studied are the scenario B, scenario B' that is a modification of scenario B and the scenario D, where scenario B' is formed by the association of level 1, level 2 and 10 times the level 3 in order to pick up a total of 10 tons.

All these scenarios are created for the collection and transportation of a total mass of 10 tons using a different transport structure. Scenarios B and B' are divided in 3 levels of transportation while scenario D is divided in 4 levels. In scenario B, level 4 is using a utility truck that collects 10 tons, on the other hand, in scenario B' collection and transportation are done with ten pickup trucks that transported 1 ton each. The results presented in Figure 3.5 show that scenario B' is more energy efficient than scenario B.

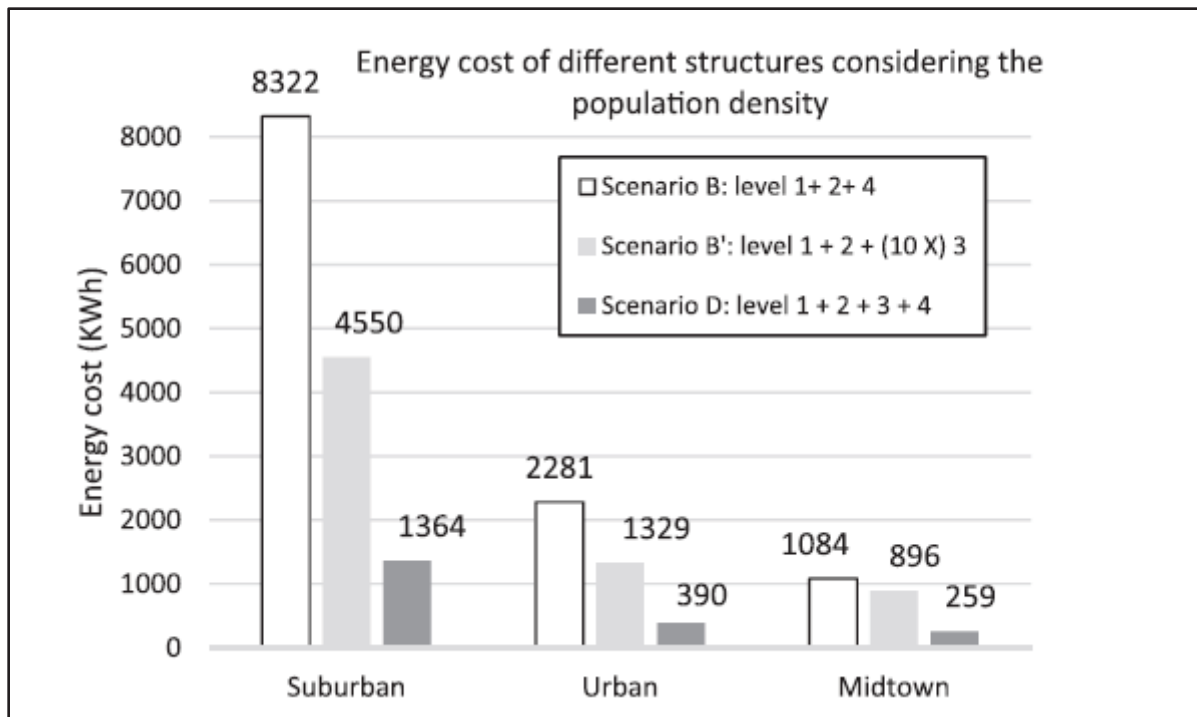


Figure 3.5 Energy Costs of the collection using different structures

This suggests that from an energy stand point and considering the energy of the transportation method and the energy consumed when stopping and engaging in traffic, using ten times the maximum payload of the transportation method of level 3, is better than using once the transportation of level 4. When considering the energy cost of a power engine transportation method, smaller payload implies smaller gasoline and energy consumption but it also generates smaller losses of energy when stopping for the pickup of the materials.

3.5.3 Time and transportation method

When developing a waste management system, there is a combination of parameters to consider, for instance the energy spent on the collection and transportation or the payload of the fleet. In this section, the parameter studied is the time elapsed in the process. The results presented in Tableau 3.5 show that for the same scenario, the time elapsed diminished with the increase of population density.

Tableau 3.5 Results of time and energy considering different scenarios and neighborhoods for different scenarios for the collection 10 tons of waste

Neighbor hood type	Scenario					
	Suburban		Urban		Midtown	
	Time (h)	Energy (kWh)	Time (h)	Energy (kWh)	Time (h)	Energy (kWh)
A	18	82332	6.4	18738	5.4	10151
B	23	8322	7.7	2281	6.3	1084
C	21	5039	7.1	1199	5.9	681
D	26	1364	8.4	390	6.8	259

However, when considering the same neighborhood, the relation of the time elapsed for different scenarios is not clearly defined. Contrary to the changes of energy on the same conditions, the time elapsed between scenarios when considering the same urban structure doesn't show a clear relationship.

However, when considering the same scenario, the time elapsed always decrease with the increase of density population in the studied case. As the energy cost, the value of time elapsed depends on the number of stops and the time of each stop and not only depends on the time of the transportation method itself.

These results confirm that the use of a transportation method that consumes more energy allows the transport of the material faster than a transportation method that consumes less energy, forming a compromise between the energy expenditure versus the time elapsed for the transport of materials.

The results also indicate that for the complete analysis of transport structures, it is important to consider the interactions between the time of stops during pick up and time of transportation.

3.6 Discussion

The analysis of the structures considering the population density shows that the creation of clusters within a city with a high population density is beneficial for the energy cost of material transportation but the energy during stops of the chosen transportation method had to be evaluated. As stated by the constructal theory, the challenge for city planners is to generate a collection and transport structures where the flow structure benefit the entire system. In this case, the exergetic material input per unit of service, should include the study of the entire hierarchical structure (Dewulf and Van Langenhove, 2003).

The relationship between energy costs and the time elapsed for each structure depend on the number of stops and energy of stops per level, but the impact of those parameters is different for each transportation method. So the design of the waste collection and transport structure should consider different characteristics of the transportation method. The first aspect to consider is the change and technology of transportation method in each level. In many countries scavengers are considered the first level of waste collection (dos Muchangos et al., 2017), while in other countries, other types of vehicles are being considered for community tasks such as waste or old paper collection using electric vehicles or even horses carts (Rogoff and Ross, 2017). For an engine powered transportation method, the changes in sizes of containers or the type of containers are the reflection of changes in transportation methods (Rodrigues et al., 2016). . Secondly, the differences of the urban territory, like the accessibility of the city and the topology conditions should be considered. Finally, the material collected should be analyzed to define the urgency of the collection and the impact on the delay of it. In many countries, there are containers where people in the neighborhood can leave their own waste for a later pick up (Rodrigues et al., 2016).

When considering the waste management and transportation of materials, there are two opposite phenomena to take into account: the first one is the energy of transport associated with the proposed transportation method and the second one is the losses of energy when stopping in order to pick up the materials. These results suggest that when choosing the

structure for the waste management system, the transportation method should consider not only the energy cost when transporting materials but also the energy losses when stopping during the collection process and the number of stops of each transportation method. Decision makers need to evaluate the trade-off between often-conflicting options to select the best available technology or fuel source (Ölçer and Ballini, 2015).

The potential of this approach was demonstrated using the data of the city of Montreal and using plausible transportation methods. However, payloads and transportation methods can be changed to be suitable to other cities or environments, more over, the results of this paper, show that the use of hierarchical levels should be used as a method to reduce the energy consumption of waste collection and transport. This study proved the relevance of the method and the importance of using the constructal theory as a tool of waste management system in urban centres. This approach may be used by city officials for the transport of other materials like recycling or composting materials. Studying the entire transport structure and their life cycle energy use and emissions, municipal official may help build an eco-friendlier environment and promote sustainably (Schliwa et al., 2015).

3.7 Conclusion

Results show the benefits from an energy standpoint of using a hierarchical structure based on the constructal theory when considering the transportation methods chosen in this study. Moreover, these show that the concentration of population and material generation has a positive impact on the energy cost of the transport structure. This is important because this highlights the fact that the policies of waste management of large cities should concentrate more on the densest centres. The results further reveal that the relation between energy costs and the transportation method depends on different aspects of the transport structure, not only on the transport mode itself but on the number of stops and on the energy spent on them. Additionally, more modern and eco-friendlier transportation methods should be used for the transportation in urban areas, this would represent a step towards sustainability and greener urban centres.

The limitations in this study worth mentioning are the difficulty to find reliable information on energy consumption rates for different transportation methods and speciality for the human powered technologies under loading conditions. It is important to mention that the speed of transportation, the load of material transported, the conditions and the steepness of the roads impact energy calculations. The presented transportation structure was decided, as an example, nevertheless, the study provides a foundation for further investigations on the usage of the constructal theory using different transportation methods for the material transportation in urban centres.

CHAPITRE 4

AVAILABILITY AND ALLOCATION OF MUNICIPAL ORGANIC WASTE FOR BIOMETHANE RECOVERY

Rosario Corbo ^a, Mathias Glaus ^b

^{a,b} Département de Génie de la construction, École de Technologie Supérieure
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article soumis pour publication à la revue ‘Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy’, avril 2024.

4.1 Abstract

Strategic planning of municipal solid waste management systems includes waste recovery but also treatment technologies and territorial features like the availability of materials and location of the treatment process. This work presents a systemic approach for the estimation of a chain's service area size, based on the energy balance of waste collection and recovery profits. The model assigns a recovery performance value that can be positive or negative. If it is positive, it means that the configuration of the system considering the energy spent in collection and transportation of municipal waste and the energy recovery allows gaining energy.

Applied to the case of the province of Québec for the municipal organic waste and biomethane recovery by anaerobic digestion. The energy balance was studied for four different scenarios, based on the population and road density, the studied scenarios have a linear density of 20.7, 37.5, 80.6 and 347 people/km. The study also analyzes the influence of the recovery rate of municipal organic waste on the performance of biomethane recovery. These results show that when the recovery rate increases, the mass of municipal organic waste that permits the maximum recovery energy also increases, but the rate of that increase depend on the technology used for the recovery process. This approach can be used in other territories and the results provide insight for city planners and policy-makers regarding the global chain of biomethane recovery.

Keywords:

Energy balance, biomethane recovery, waste management, transportation, collection

4.2 Introduction

Waste management process plays a major role in the collection of different materials including the by-products of the industrial process or products to be recycled. In the last decades, the focus of waste management shifted from final disposal to the development of a circular economy approach based on resource and energy recovery (Ferronato et al., 2019). Many treatments are in place for waste management (Rylander and Lagerkvist, 2024) but many processes like incineration release many contaminants to the atmosphere posing serious damage to human health (Doña-Grimaldi et al., 2019). The decarbonization of the power generation, sustainability and energy security are the focus of many countries and to achieve these goals, some changes towards gas consumption are needed (Richards and Al Zaili, 2020). Recovering bioenergy from municipal organic waste has gained increasing importance worldwide (Ahrens et al., 2017) and the availability of materials and the potential energy recovered from different organic materials are studied (Dey and Thomson, 2023) considering the availability and the territory (Awedem Wobiwo et al., 2018) and the generated by-products (Awedem Wobiwo et al., 2017). Biological and thermal treatments are available to treat the growing quantities of municipal solid waste generated (Tabatabaei et al., 2020). Biological treatments degrade biodegradable waste materials under controlled biological processes by living micro-organisms such as bacteria and fungi, this process can be under aerobic or anaerobic conditions (Saravanan et al., 2022). Aerobic composting process needs controlled operating conditions such as temperature, moisture and oxygen concentration, the product has to be degraded after separation of non-compostable materials (Saravanan et al., 2022), it is time consuming and needed space for the degradation of organic matter. Despite all the available technologies, anaerobic digestion has the best environmental and economic performances (Tock and Schummer, 2017).

There's a growing interest in sustainability and anaerobic digestion presents a viable approach toward renewable energy, in order to generate biogas from municipal solid waste the entire municipal waste management process needs to be studied (Baldé et al., 2022). This renewable energy can be used as an alternative to transport fuels or electricity generation (Ayodele et al., 2019) and it can displace conventional fossil energy sources and mitigate greenhouse gas emissions (Richards and Al Zaili, 2020).

Figure 4.1 presents the biomethane recovery system from municipal organic waste. The anaerobic digesters produce biogas but to be used as biomethane, it must be upgraded through the removal of CO_2 and cleaned from contaminants (D'Adamo and Sassanelli, 2022). This process allows the biomethane to be used for different applications, like cooking, domestic heating or alternative fuel for shipping and road transport sectors (Ardolino et al., 2018). Biomethane is essentially purified biogas that contains a certain percentage of methane and it can be either used as fuel for vehicles running on compressed natural gas or injected into the natural gas grid (Vrbová and Ciahotný, 2017).

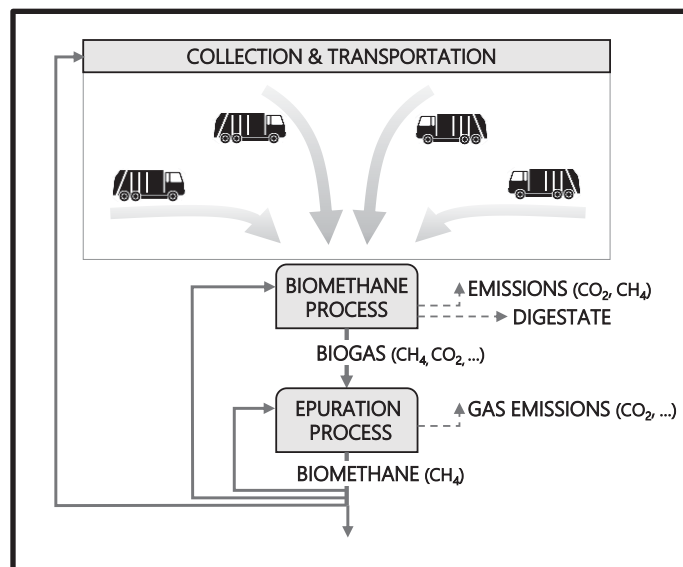


Figure 4.1 Biomethane recovery system adapted from Rotunno et al. (2017, p. 3)

The anaerobic digestion of municipal organic waste to produce raw biogas involves several process steps: waste pretreatment, digestion, and handling of the digestate. The obtained biogas requires additional steps for its commercialization and usage as a valuable product. Biomethane can be obtained using biogas purification systems such as membranes, biofilters and water scrubbers amongst other technologies (Chan Gutiérrez et al., 2018).

There are various physical and chemical processes available like adsorption, absorption, cryogenics or membrane separations, and some biological processes for biogas upgrades, and each process are sites and case-specific (Koonaphapdeelert et al., 2018) and many add an enzymatic catalysis (Ramos et al., 2022). Many authors have studied the process of upgrading (Kvist and Aryal, 2019) and (Passalacqua et al., 2024) but in this paper, the calculations to produce methane are based on the real production values of the anaerobic digesters in the province of Québec. It has been proven that the nature of the substrate, the design of the digester and upgrading process determine the composition of the raw biogas (Rafiee et al., 2021).

The allocation of organic waste and the distribution of resources of the supply chain for anaerobic digesters was studied in order to diminish the total cost of supplying materials and studying the biomethane production system (Ghosh et al., 2023). The economic factors were also studied by other authors to optimize the location of the facilities (Bavaghar Zaeimi and Abbas Rassafi, 2021). The temperature of the reaction in the digester and the loading rate can influence the biomethane recovery process (Yang et al., 2022), so the allocation of the municipal organic waste is a key factor of the process. Some authors had proven that the cost of transport is the most important cost when analyzing the energy of the supply chain (Blazquez and Paredes-Belmar, 2020). It has been studied that the urban form and density of the city have an important impact on energy use (Liu et al., 2017) and consequently the efficiency of the waste management process is related to the territorial conditions (Tirkolaee et al., 2020). The spatial analysis of waste management transport structures changes with the structure of the territory (Tanguy et al., 2016) and some computational tools are available to study the allocation of resources (Azri et al., 2023).

Moreover, the quantity of the municipal organic waste collected and transported to the digester dictates the energy spent on the process and the travelled distance for the collection is related to the energy of biomethane recovery system. Some authors tackled location and allocation of the waste management using the spatial interaction of the model in a constrained environment, showing the impact of the transport in the production chain of biomethane (Zbib and Wøhlk, 2019).. This paper presents a simplified approach based on different scenarios to study the conditions of feasibility and energy efficiency of the technology of the biomethane recovery system. The spatial model created in this paper studies the effect of availability of municipal organic waste on the energy efficiency of the chain's service area size of biomethane recovery and the studied variable is the dimension of the territory. This model represents an opportunity for the waste management sector to improve the supply chain of the biomethane recovery considering the location of the digester and the characteristics of the territory.

This paper presents a simplified approach considering 4 different scenarios to present the extreme conditions for the biomethane conversion system. These scenarios represent the density of waste that is collected and transported to the biomethane recovery facility. The energy spent in collection and transportation from the household to the biomethane recovery facility is included in the study to shed light on the efficiency and viability of the entire biomethane recovery system. An analysis of the impact of the recovery rate of municipal organic waste in the territory on the chain's service area size was also included in this analysis.

4.3 Methodology

The model developed in this paper is based on a systemic approach that considers the gains and losses of energy of the biomethane recovery system. The global energy of the biomethane recovery system includes the energy spent for collection and transportation of municipal organic waste, the energy spent for the biological treatment and the energy embedded in the biogas.

The model is based on the relation between the dimensional characteristics of the territory and the availability of municipal organic waste. The chain's service area size is analyzed to determine the beneficial conditions of the biomethane recovery system.

4.3.1 Territorial breakdown and distances for collection and transportation

This systemic model is based on the relation between the territory dimension and the availability and density of municipal organic waste generated and collected.

The breakdown of the area is represented by a symmetrical grid and the anaerobic digester is located at the centre of the area. The territory is divided in smaller squares where each small square represents the area of the collection of one truck. This approach calculates the total collected organic waste using the variable of the dimension of the territory.

To calculate the distance travelled by the truck in the collection and transportation process two different configuration types are presented in Figure 4.2.

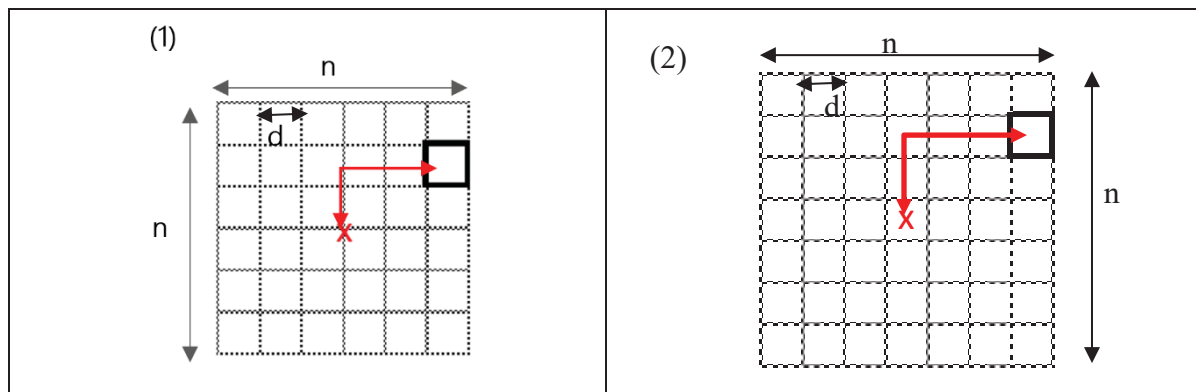


Figure 4.2 Configuration breakdown grid type ($n \times n$) centred on the recovery facility with the cell unit of collection represented by d^2 dimensions for both configuration types: (1) even number of cell units in the grid to travel from the unit cell to the digester or (2) uneven number of units in the grid to travel from the unit cell to the digester

Where :

d is the dimension of each unit cell

The model is based on a cycle of collection or a defined period, so the energy balance and all the parameters are based on that period that can be adapted to the territorial situation. The equations that define the territorial breakdown are presented in (4.1) and (4.2).

$$n_{travel} = \frac{Waste_{total}}{C_{truck}} \quad (4.1)$$

Where:

n_{travel} : number of travels or collection cycles needed for the collection of the organic waste of the area (unit/period)

$Waste_{total}$: total collected waste of the area (t/period)

C_{truck} : payload of the truck used for the collection and transportation (t/truck)

$$n = \sqrt{n_{travel}} \quad (4.2)$$

Where:

n is the number of unit cells to cover the entire area.

The total distance travelled one way represents the total distance connecting the centre of all the unit cells and the recovery facility, this distance is represented in (4.3) and (4.4).

$$\text{even} : DT_{tot.1way} = \left(\left(\frac{n}{2} \right) \times n^2 \right) \times d \quad (4.3)$$

$$\text{uneven} : DT_{tot.1way} = \left(\left(\frac{n}{2} \right) \times (n-1) \times (n+1) \right) \times d \quad (4.4)$$

Where :

$DT_{tot.1way}$ is the total distance travelled one way from the centre of each unit cell to the recovery facility (km/period).

The total distance travelled to go pick up the waste and then come back is represented in (4.5) and (4.6).

$$\text{Even} : DT_{tot.2way} = n^3 \times d \quad (4.5)$$

$$\text{uneven} : DT_{tot.2way} = (n \times (n - 1) \times (n + 1)) \times d \quad (4.6)$$

Where:

$DT_{tot.2way}$: total distance travelled two ways (back and forth) from the centre of each unit cell to the recovery facility (km/period).

The area of each unit cell is calculated considering the quantity of municipal organic waste available and the density of the population in the territory, and it is presented in (4.7).

$$d^2 = \frac{C_{truck}}{w_{hab} \times d_{pop}} \times 1000 \quad (4.7)$$

Where :

d^2 : area of each unit cell (km²)

w_{hab} : quantity of municipal organic waste generated (kg/people/period)

d_{pop} : density (people/km²)

The dimension of each cell unit of the grid is represented in (4.8).

$$d = \sqrt{\frac{C_{truck}}{w_{hab} \times d_{pop}} \times 1000} \quad (4.8)$$

The distance for the collection of organic waste considers, on one hand, the capacity of the truck and, on the other hand, the availability of organic waste and the density of population and roads in the area. This distance of collection per cell unit DC_{truck} is presented in (4.9).

$$DC_{truck} = \frac{C_{truck}}{w_{hab}} \times \frac{d_{road}}{d_{pop}} \times 1000 \quad (4.9)$$

Where :

DC_{truck} : distance of collection per cell unit (km/period)

d_{road} : density of routes (km/km²)

Then, the total distance of collection for each scenario is calculated by multiplying the distance of each cell unit DC_{truck} by the number of cells considered ($n \times n$). This total distance of collection for each scenario $DC_{tot.2way}$ is presented in (4.10).

$$DC_{tot.2way} = DC_{truck} \times (n \times n) \quad (4.10)$$

Where :

$DC_{total.2way}$: total distance of collection (km/period)

4.3.2 Energy balance of the biomethane recovery process

This approach relates the dimension of the territory to the energy spent not only on the municipal organic waste management but also on the biomethane recovery system. Considering the dimension of the cell as a variable, this model calculates the distance of

collection and transportation on the municipal waste and the availability of municipal organic waste to be transformed in biomethane.

The total energy consumed for the collection and transportation of municipal organic waste is the sum of energy consumed in each mode. The total energy consumed by the collection and transportation of organic waste is represented by (4.11).

$$E_{T,consumed} = E_T + E_C \quad (4.11)$$

Where :

$E_{T,consumed}$: consumed energy of collection and transportation weekly (MJ/period)

E_C : consumed energy on the collection mode (MJ/period)

E_T : consumed energy on the transportation mode (MJ/period)

In the simplified systemic approach developed in this paper, the digester is located in the centre of a grid-type structure, and the total energy consumed can be calculated using $DT_{tot,2way}$ presented in (4.5) or in (4.6) and $DC_{tot,2way}$ presented in (4.10). The total energy consumed for collection and transportation includes the embedded energy of the fuel used for the truck, in this case, is the fossil fuel consumption to produce 1 litre of diesel. These energies are presented in (4.12) and (4.13)

$$E_C = (FC_C \times DC_{tot,2way}) \times E_{diesel} \quad (4.12)$$

$$E_T = (FC_T \times DT_{tot,2way}) \times E_{diesel} \quad (4.13)$$

Where:

FC_C : fuel consumption of trucks on collection mode (L/km)

FC_T : fuel consumption of trucks on transportation mode (L/km)

E_{diesel} : embedded energy in 1 litre of diesel (42.6 MJ/L; (Tanguy et al., 2017))

Some authors like (Pantaleo et al., 2013) and (Wright and Brown, 2007) include the tortuosity (τ) of the territory that represents the ratio of road length and the length of the arc connecting two adjacent nodes of the grid to account for the lack of linearity of some roads. But this factor is not included in this paper, because the actual values of density of population and roads are used, these values are based on the data of the province of Québec (Ministère des transports du Québec, 2022).

The values used in (4.12) and (4.13) are fuel consumption of collection (FC_C) of 0.84 L/km and fuel consumption in transportation mode (FC_T) of 0.61 L/km (Di Maria and Micale, 2013).

The gain of energy obtained by the production of biomethane is presented in (4.14).

$$E_{CH_4} = LHV_{CH_4} \times V_{CH_4} \quad (4.14)$$

Where:

E_{CH_4} : embedded energy in the biomethane (MJ/period)

LHV_{CH_4} : 36 MJ/Nm³ (International energy agency, 2020)

V_{CH_4} : volume of biomethane produced (Nm³/period)

LHV_{CH_4} represents the lower heating value of biomethane. This considers the energy value of the biomethane after the upgrade from the biogas, the product can be used without the need for any changes or transformations, and it can be used in natural gas vehicles.

The energy balance of the global chain of biomethane recovery from municipal organic waste to usable biomethane is presented in (4.15).

$$\text{Balance}_{global} = E_{CH_4} - E_{T,consumed} \quad (4.15)$$

Where:

Balance_{global} : energy balance of the global chain of biomethane recovery (MJ/week)

4.4 Description of the study case: Québec, Canada

To calculate the distance of collection and transportation of the municipal organic waste, the available data of the province of Québec was used (Gouvernement du Québec, 2022). This approach is based on the density of the population and the density of roads in the province, creating 4 different scenarios representing 4 different spatial characteristics. Each scenario represents on one hand the availability of municipal organic waste represented by the population density and, on the other hand, the distances for the collection and the transportation represented by the route density. This data is extracted from (Gouvernement du Québec, 2022), represented in Tableau 4.1. The province of Québec is divided into 17 administrative regions with different population density and route density. In this case, the entire province is separated in 4 different scenarios considering the linear density of the population which is the number of people per unit of length, as defined in (4.16).

$$\text{Linear density of population} = \frac{d_{pop}}{d_{road}} \quad (4.16)$$

Tableau 4.1 Scenarios, administrative regions, and density in the province of Québec, Canada

Administrative region	Population (people)	Road network (km)	Area (km ²)	Linear density of population (people/km)	Dimension cell unit (d) (km)
Montréal	2,052,910	5,439	498	377	
Laval	442,648	1,745	246	254	
Scenario A	2,495,558	7,184	744	347	2.2
Capitale-Nationale	700,616	7,369	18,797	95.1	
Montréal	1,442,433	16,800	11,131	85.9	
Lanaudière	471,748	8,262	12,422	57.1	
Scenario B	2,614,797	32,431	42,350	80.6	16.3

Administrative region	Population (people)	Road network (km)	Area (km²)	Linear density of population (people/km)	Dimension cell unit (d) (km)
Laurentides	559,700	12,126	20,771	46.2	
Mauricie	263,603	6,732	35,865	39.2	
Centre-du-Québec	234,163	6,271	6,930	37.3	
Chaudière-Appalaches	410,829	11,155	15,080	36.8	
Saguenay-Lac-Saint-Jean	274,880	7,692	98,710	35.7	
Outaouais	369,171	10,429	30,803	35.4	
Estrie	310,733	9,211	10,214	33.7	
Bas-Saint-Laurent	199,977	6,271	22,234	31.9	
Scenario C	2,623,056	69,888	240,607	37.5	38.7
Côte-Nord	94,766	4,289	247,634	22.1	
Gaspésie-îles-de-la-Madeleine	94,079	4,543	20,309	20.7	
Abitibi-Témiscamingue	145,690	7,305	57,739	19.9	
Scenario D	334535	16,138	325,682	20.7	126.2

Considering the low road density of 9.54 people/km and because there are no waste management services in the north of Québec that administrative region is left out of this analysis.

Based on the waste management report from the province of Québec (RECYC-QUÉBEC, 2018), the quantity of municipal organic waste recovered considered w_{hab} is 0.611 kg per person weekly and that represents 16% of recovery rate. To study the effect of the change of recuperation percentage on the energy balance of the global chain of biomethane recovery, scenario C is used.

In all cases, the payload of the truck C_{truck} considered is 10 tons and the collection cycle considered or period is one week.

The data of the province of Québec, Canada (Ministère de l'environnement et la lutte contre les changements climatiques, 2022) is used to reflect the characteristics of the biomethane recovery system under Québec's conditions. The production performance of Québec considers only the digesters for the municipal solid organic waste without considering the municipal slurry data. The data of different anaerobic digesters operated under real conditions is used to calculate the volume of biomethane produced, this is shown in Figure 4.3.

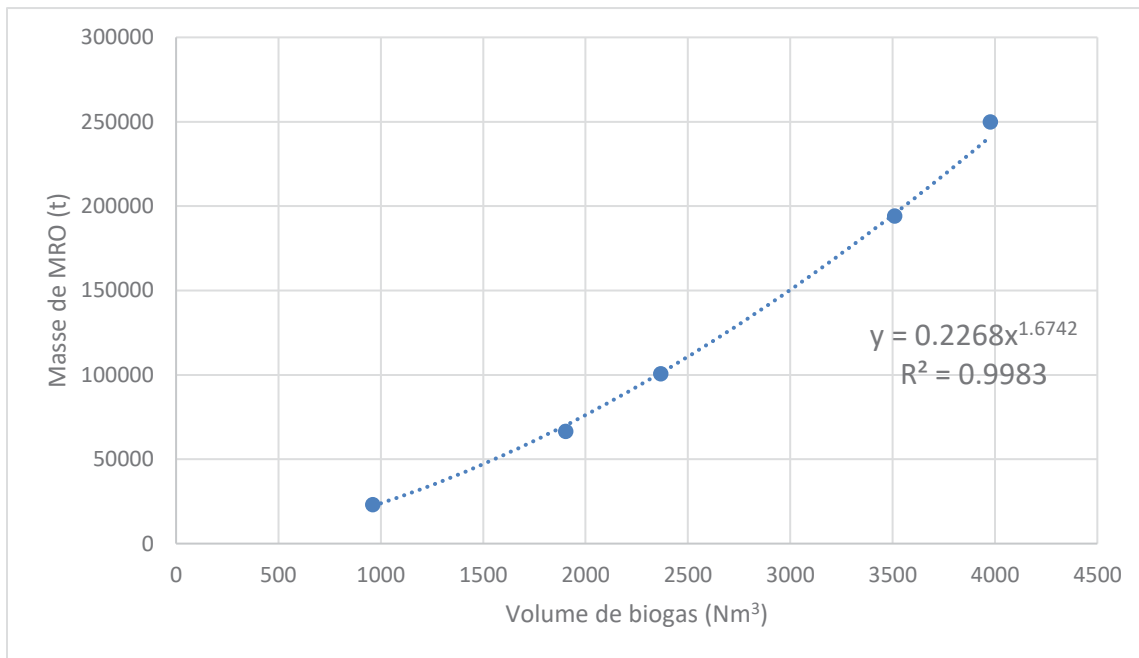


Figure 4.3 Production performance of biomethane production installations in Québec tiré de Ministère de l'environnement et la lutte contre les changements climatiques (2022)

4.5 Results and discussion

The impact of the dimension of the territory on the chain's service area size for the biomethane conversion system is studied for different scenarios of linear density of the population, The results of the presented model shed light on the efficiency of the biomethane recovery system and the dimension of territory studied.

First, the distance of collection and transportation is studied for the territory of each scenario. Secondly, the global energy balance is presented to study the impact of the dimension of the area on the chain's service area size. Finally, the impact of the recovery rate of municipal organic waste on the chain's service area size is presented.

4.5.1 Distance of collection of municipal organic waste in the area

The distance of collection and transportation in the area is calculated considering that the collection truck has a payload of 10 tonnes, so this distance depends on the population and road density of the territory. For each scenario, the parameter of DC_{truck} that is the distance of the collection per cell, for scenario A $DC_{truck} = 47$ km, for scenario B $DC_{truck} = 203$ km, for scenario B $DC_{truck} = 436$ km an, for scenario DDC $DC_{truck} = 790$ km.

Figure 4.4 shows the difference between the distances travelled for the collection and the transportation processes when the size of the territory of the collection increases. The distance travelled for the transportation for the same area size is always higher than the distance of collection and the difference between these distances is more important when the area increases, as shown in Figure 4.4..

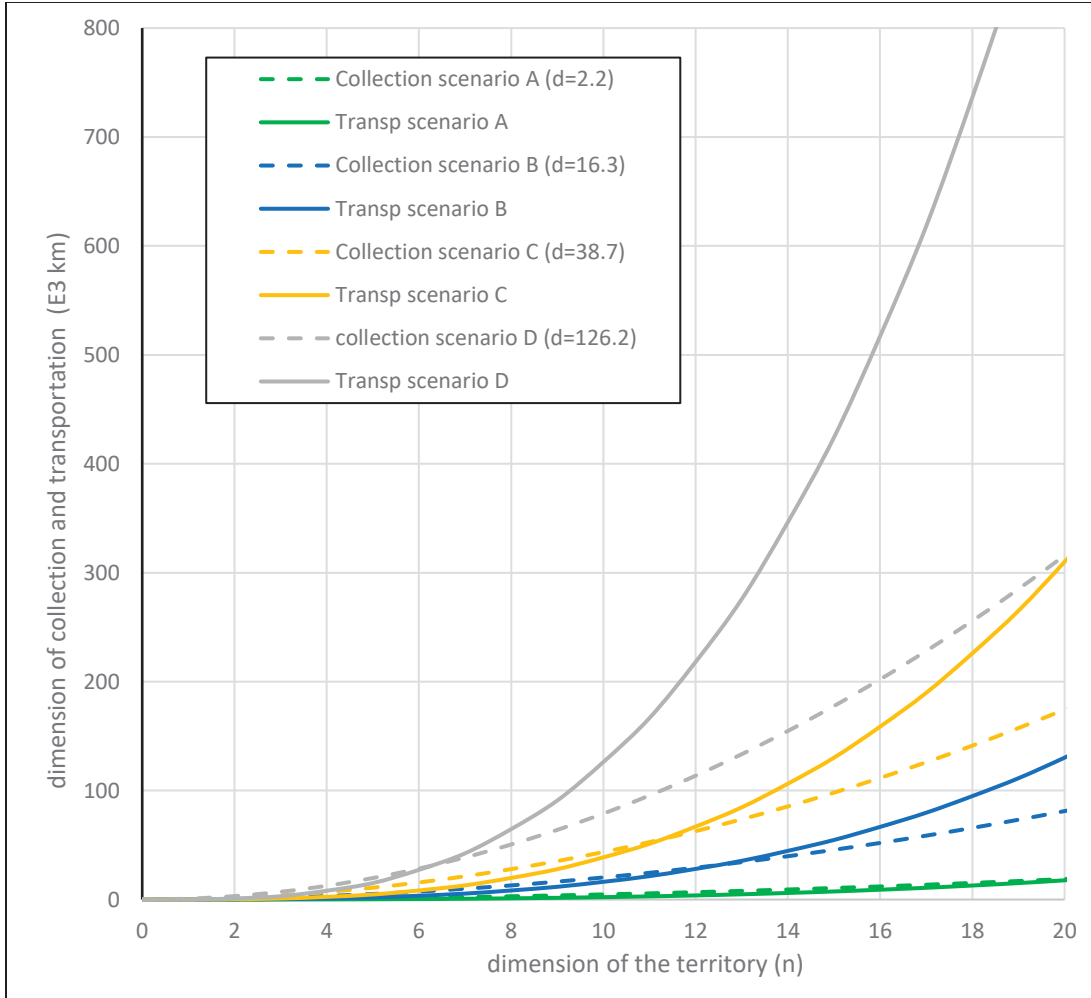


Figure 4.4 Distance of collection and transportation on the territory

As seen in Figure 4.4, the distance of both processes increases with the area size. This figure shows that the difference between the distances of collection and transportation for the same area size is more important for the less dense scenario. To compare the distance of collection and transportation, the indicator $R_{transport}$ is introduced as defined in (4.17).

$$R_{transport\ scenario\ i} = \frac{DT_{tot,2way\ scenario\ i}}{DC_{tot,2way\ scenario\ i}} \quad (4.17)$$

When the value of $R_{transport\ scenario\ i}$ is less than 1, the distance travelled for the collection of organic waste is higher than the distance travelled for the transport of the materials. When $R_{transport\ scenario\ i} = 1$ means that $DT_{tot,2way\ scenario\ i} = DC_{tot,2way\ scenario\ i}$. For scenario A the value of that point is when $n=16$ and corresponds to the collection of 2'560 t/week, for the scenario B it is when $n=10$ corresponding to 1'000 t/week, for the scenario C it is when $n=9$ corresponding to 810 t/week and for the scenario D it is when $n=5$ corresponding to the collection of 250 t/week.

4.5.2 Energy balance of the global chain of biomethane recovery system

In Figure 4.5, the results for the energy balance of the global biomethane recovery are presented, considering the entire process from collection and transportation of the municipal organic waste to the production of the usable biomethane. For each scenario, the parameter of d is included as an indicator of the density of the area, this parameter represents the dimension of the unit cell of the area for the collection of the municipal organic waste.

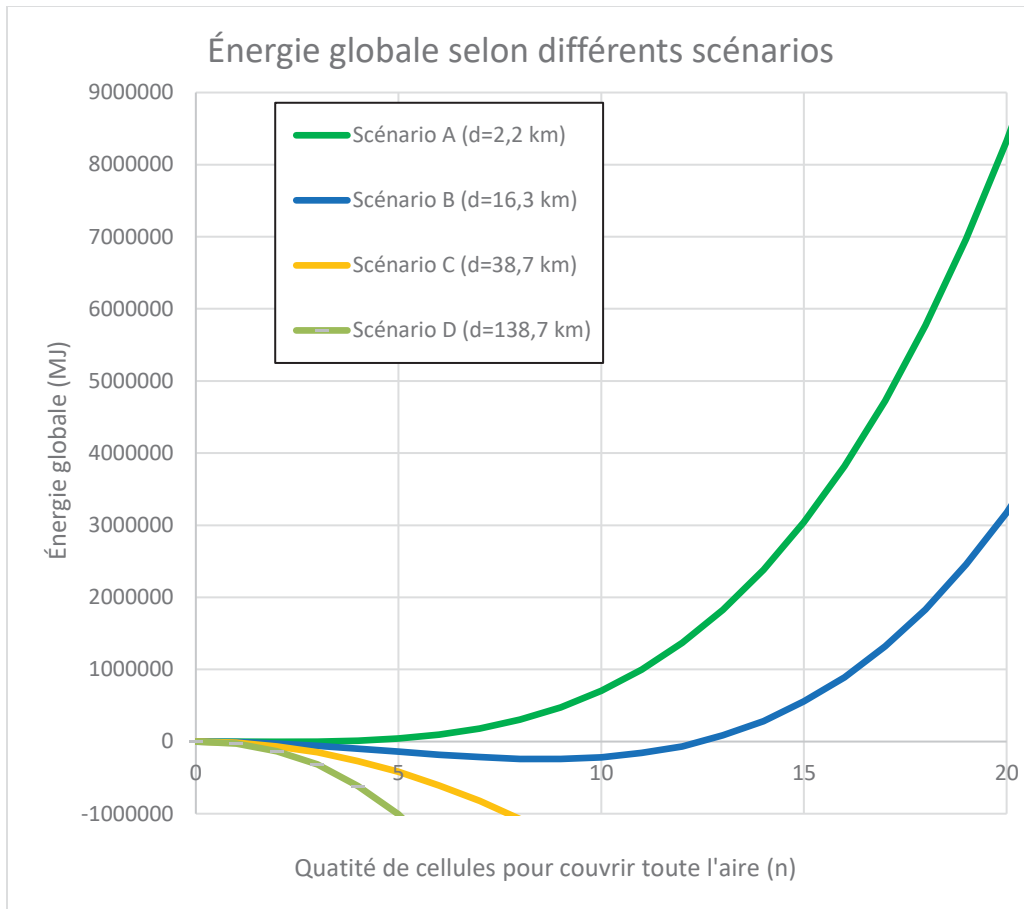


Figure 4.5 Energy results of the global chain of biomethane recovery every week

The results in Figure 4.5 show that the resulting curve of the balance of the global chain of the biomethane recovery system is a polynomial curve. For each scenario, there's a maximum distance after which the energy balance began to decrease when increasing the distance of the collection, and eventually, it would become energy consuming. For the densest scenario, in the range of mass collected studied, the energy balance of the process of biomethane recovery become positive after some cell units but for the two least dense scenario, the energy balance is always negative.

The quantity of collected waste is related to the dimension of the area of collection as defined in the (4.2). For the scenario A, the energy balance begins to be positive for a value of $n=4$ that represents a collected quantity of 160 tons/ week and for the scenario B, the energy balance begins to be positive for a value of $n=12$ that represents a collected quantity of 1440 tons/

week. The energy balance of the global chain of biomethane recovery has a maximum point and the quantity of the collected waste to achieve it can be calculated. The amount of the collected waste where the energy balance begins to have negative values increases with the density of the territory and can also be calculated, For the scenarios C and D, the values can't be calculated because the energy balance is always negative under all the conditions.

The curve of the energy balance of the global chain has a maximum, the mass collected to achieve this maximum can be calculated to calculate the energy value of this maximum. Where the curve intercepts the ax and begins to have a negative value represents the point where the global chain of the process begins to lose energy. So, if the mass of municipal organic waste to be collected in the territory is higher than the point where the energy balance of the global chain has that maximum, adding other digesters in the territory should be considered to diminish the quantity of organic waste of each digester. By doing so to achieve the maximum point of energy recovery of each digester.

To increase the availability of municipal organic waste generated in the area, the density of the population can be increased representing a higher availability of organic waste in the area, or another source of organic waste can be recovered and used in the digester. Some cities and municipalities encourage the local industries to treat their organic waste in the same digester and by doing so, the rate of recuperation is increased.

4.5.3 Impact of recuperation of organic waste

This analysis aims to evaluate the impact of different percentages of recuperation of organic waste on the energy balance of the global chain of biomethane recovery.

Figure 4.6 shows that the percentage of recuperation of organic waste in the area influences the parameters of the energy balance of the biomethane recovery system, not only in the

maximum of energy that can be recovered but also in the quantity of collected waste to achieve it.

In the example of Figure 4.6, scenario C is used because 33% of the population of the province and 8 of the 17 administrative regions of the province of Québec are included in this scenario.

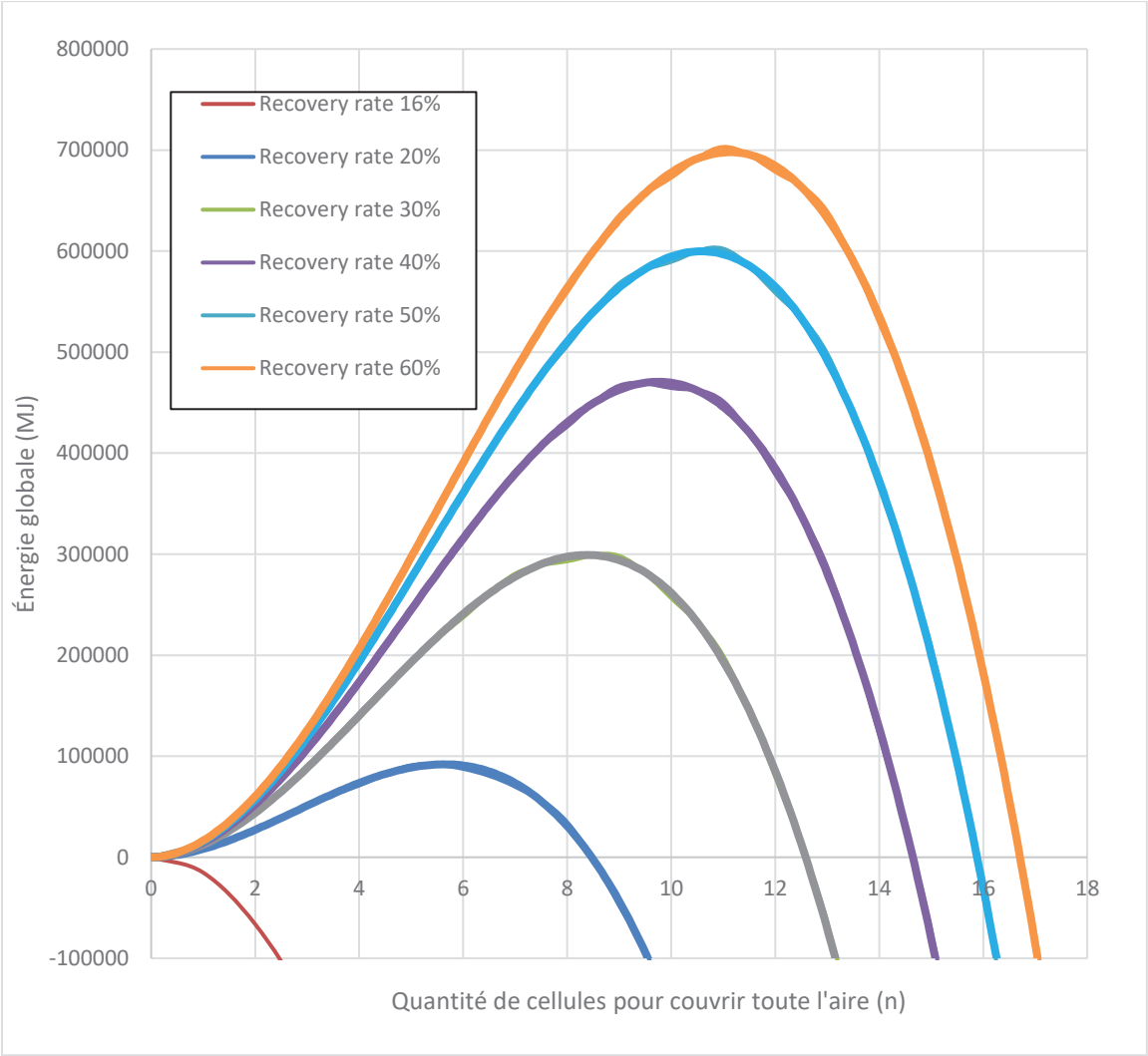


Figure 4.6 Energy balance of the global chain of biomethane recovery for different recovery rates for the scenario C

The change in the percentage of recovery of municipal organic waste also impacts the point representing the collected waste where the energy balance changes from positive to negative and where the energetic balance of the global chain of biomethane recovery becomes negative.

The results in Figure 4.6 show that the energy balance of the global chain of biomethane recovery has a maximum and it also shows the amount of the collected waste where the energy balance begins to have negative values for different recuperation rates. The scenario C is studied and 8 administrative regions are included in it representing 34% of the Québec's population. The maximum recovery rate in this study is 60% because that is the government goal for the year 2025 and 16% is the actual rate of the province of Québec.

In the best-case scenario of a recuperation rate of 60%, the maximum, the quantity of municipal organic waste that can be recuperated for the biomethane recovery process has a dimension area of $n=11$ that represents a quantity of collection of 1,210 t/week and energy balance of the process becomes negative for a dimension area of $n=17$ that represents a quantity of 2,890 t/week.

The results of show the maximum energy recovery for each territory change with the recuperation rate and the design of the digester is related to the quantity of organic waste to degrade. But to be able to recuperate the maximum energy possible, the recuperation rate of the territory has to included in the study. So, the policy-makers must integrate not only the spatial dimension of the waste management but also the technological aspects of the recovery process. As seen in Figure 4.5 and Figure 4.6, for a specific territory with a specific dimension area (n), the energy value that can be recuperated change with the amount of collected waste to be recovered and at the same time, this change with the recuperation rate of the territory.

In some cases, the rate of recuperation is increased by adding to the collection of municipal organic waste other organic waste recuperated from the surrounding industries or by adding other organic waste by increasing the available sources, like biomass or garden waste collected in the area.

4.6 Conclusion

Results show the importance of considering the chain's service area size for the municipal waste management to study the energy benefit of the biomethane recovery system. These show that the density of the population has a positive impact on the chain's service area size and on the energy balance of the global chain of biomethane recovery system. However, the global energy balance of the biomethane recovery system increases up to a certain point and when collecting more municipal organic waste than that maximum, the energy balance of the global chain begins to decrease. When the mass of the collected waste is higher than the maximum possible energy recovered, the energy losses increase and then, the global chain of biomethane recovery system begins losing energy. The linear density of population is an important factor to consider because the losses of energy associated with the collection and transportation of municipal organic waste are related to the characteristics of the territory. Therefore, waste management policies should consider the density of population and road distribution of the territory, to design the digester and waste management processes accordingly. These also reveal that the location of the anaerobic digester must consider the characteristics of the territory. In the case of a big territory with a low linear density, a multiple digester situation in the territory should be considered.

It has also been proven that the rate of recuperation of municipal organic waste improves the chain's service area size of biomethane recovery system. When designing the digester for biomethane recovery, the maximum point for energy recuperation changes with the recuperation rate, so the recuperation rate of the territory must be included in the study of the chain's service area size. For that reason, some cities and municipalities consider adding organic waste coming from industries in the area or adding other sources of organic waste like garden materials or organic industrial waste.

The limitations of this study are mainly the calculations of the energy consumption rate of collection and transportation of the municipal organic waste, considering all the different fuels that can be used and all the types of waste collection trucks involved. The embedded energy of the biomethane was calculated without considering the differences of quality and composition in the municipal organic waste collected in the different regions.

The density scenarios were decided as an example, nevertheless, this study provides a foundation for waste management officials to base their decision when considering the global chain of biomethane recovery. The approach developed in this study is based on the energy balance of the recovery process and only the territorial, transportation and technological parameters are needed without the need for computational tools.

The approach used for the calculations of energy spent in the transport represents a conceptual approach that can be generalized to the rest of the territory. Other methodologies using computational tools can be more precise and their energy results are more accurate but the methodology used in this article allows to compare different scenarios.

CHAPITRE 5

ENERGY OF THE CHAIN'S SERVICE AREA OF THE BIOMETHANE RECOVERY CONSIDERING DIFFERENT LEVELS OF TRANSPORTATION OF THE MUNICIPAL ORGANIC WASTE

Rosario Corbo ^a, Mathias Glaus ^b

^{a,b} Département de Génie de la construction, École de Technologie Supérieure
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article soumis pour publication à la revue 'Sustainability', juin 2024.

5.1 Abstract

This article studies the chain's service area size of biomethane recovery of the municipal organic waste, a model is created to study the energy generated considering the allocation and location of the digester, and it is based on the energy balance of the global chain of biomethane recovery. When considering the energy losses of the process, two different circumstances are considered: on one hand, the energy losses of transport level 1 that includes the losses of collection and transportation from the territory to the transfer station and, on the other hand, the transportation level 2 from the transfer station to the recovery facility. So, the transportation energy losses are related to the distance and the technology used to transportation, but also to the location of the digester and the availability of organic waste. The collection and transportation of the organic waste to the transfer station is studied considering the use of a 10 ton payload truck and the transportation to the digester is studied considering the use of a truck with different payloads: 9, 18 and 27 tons, to study the impact of the energy losses of transportation to the energy balance of the global chain. Results show that population and route densities have a significant association with the collection and transportation level 1 in the territory. Therefore, depending on the availability of organic waste and the distances to travel to the digester, having many digesters in the territory has a positive impact, over the most common use of a unique digester in the region. To demonstrate the applicability of the proposed framework, this paper focuses on a real-life case study of the administrative region of the

Montréal in the province of Québec, Canada was studied, and the administrative region was divided in 11 municipalities. This approach can be used in other territories and provides insights for city planners or policy makers regarding environmental development of the territory.

Keywords:

Sustainable development, energy balance, biomethane recovery, transportation, collection

5.2 Introduction

In urban settings, the waste management process plays a major role in the collection of different materials including the by-products of the industrial process or products to be recycled in order to encourage the sustainable development. In the last decades, the focus of waste management shifted from final disposal to the development of a circular economy approach based on resource and energy recovery (Zhou et al., 2018). In recent years, the competing needs for land, food and bioenergy production have been at the forefront of the policy debates (Benites-Lazaro et al., 2020) including the chain's service area size and the availability of organic materials. The potential energy recovered from many materials is studied (Dey and Thomson, 2023) considering the availability and the territory (Awedem Wobiwo et al., 2018). Recovering bioenergy from municipal organic waste has gained increasing importance worldwide (Ahrens et al., 2017) and many biological treatments are available to produce biogas from an organic waste fraction of municipal solid waste (Tabatabaei et al., 2020). Despite all the available technologies, anaerobic digestion has the best environmental and economic performance (Tock and Schummer, 2017).

There's a growing interest in sustainability and anaerobic digestion (Baldé et al., 2022) and this article presents a viable approach to renewable energy, considering the global process of waste management. This renewable energy can be used for transport fuels or electricity

generation (Ayodele et al., 2019), it can displace conventional fossil energy sources and mitigate greenhouse gas emissions.

In the case of waste transport, the principle of economies of scale shows that grouping flows from different producers with a transfer station could reduce the transportation costs (Dongqing et al., 2022). According to this principle, many municipalities attempted to mutualize their waste to benefit from the economies of scale (Kúdela et al., 2019). A disadvantage of this approach is that the transport system structure is not adapted to the size and characteristics of the territory served (Veiga, 2013).

The Figure 5.1 represents the biomethane recovery process from the collection of the organic waste to the transfer station and then the transport to the recovery facility.

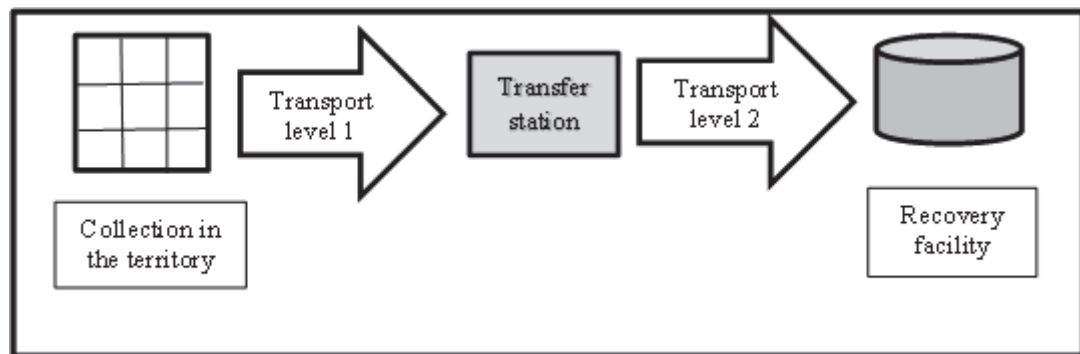


Figure 5.1 Biomethane recovery process

As seen in Figure 5.1, the territorial aspect plays a double role in the recovery process: on one hand transport level 1 that represents the collection and transportation of the organic waste in the territory going to the transfer station and, on the other hand, the transportation level 2 that represents the transportation of the organic waste from the territory to the recovery facility. This article creates a model based on the energy balance of the biomethane recovery process to study the impact of the territorial aspect of the gains and losses of energy on the different steps of the entire process.

The allocation of organic waste and the distribution of resources in the supply chain for anaerobic digesters was studied to diminish the total cost of supplying materials and studying the biomethane production system (Sailer et al., 2021). The economic factors were also studied by other authors to optimize the location of the facilities (Bavaghar Zaeimi and Abbas Rassafi, 2021). Computational tools have been used to determine the digester location (Sarker et al., 2019) and in some cases, geographic information system (GIS) were used to study the spatial distribution of waste management facilities like the transfer station (Ghosh et al., 2023). The GIS tools are used to analyse the temporal and spatial evolution of the system including the suitable locations, optimal sizes and number of biogas plants needed in the region to process the biomass that can be collected (Sanchuan et al., 2019).

Some authors had proven that the cost of transport is the most important cost when analyzing the energy of the supply chain (Blazquez and Paredes-Belmar, 2020). It has been studied that the urban form and density of the city have an important impact on energy use for transportation (Liu et al., 2017) and consequently the efficiency of the waste management process is related to the territorial conditions (Tirkolaei et al., 2020). Some authors tackled the location and allocation of the waste management using the spatial interaction of the model in a constrained environment, showing the impact of the transport in the production chain of biomethane (Zbib and Wøhlk, 2019).

The chain's service area size is influenced by the territorial aspect but also by the technological aspect of the recovery process. In this paper, the chain's service area size of biomethane recovery from municipal organic waste includes the energy losses of collection and transportation at different levels and the energy gains of biomethane recovery. The allocation of organic waste depends on the availability of materials in the territory, and the recovery rate of organic waste material dictates the quantity of materials in the territory (Ferronato et al., 2019). More over, the energy losses are associated to the different methods of transportation so for each level of transport different methods of transport are analysed in this paper (Pinto et al., 2018).

The aim of this study is to develop a systemic method to locate biomethane recovery facilities, based on the energy balance of the biomethane recovery chain. This model represents an opportunity for the waste management sector to improve the supply chain of biomethane recovery considering the location of the digester and the characteristics of the territory.

The novelty of this paper is that the energy spent in collection and transportation from the household to the digester is included in the study to shed light on the energy efficiency of the global chain of biomethane recovery. Many aspects of waste management process are considered for a single territory to study the energy impact of the location of the recovery facility, considering the interactions between the collection and the transport level 1 and level 2 and the energy recovery of the biogas. The chain's area service size, the allocation of municipal waste and the number and location of the digesters are analyzed to study the losses of the biomethane recovery process.

5.3 Methodology

The model developed in this paper is based on a systemic approach that considers the gains and losses of energy of the biomethane recovery system. The global energy of the biomethane recovery system includes the energy spent for collection and transport level 1 of municipal organic waste, the energy spent for transport level 2 of the municipal organic waste and the energy spent for the biological treatment and the energy embedded in the biogas.

To study the impact of the location of the recovery facility on the energy recovery, different scenarios are studied. First the losses of collection and transport of level 1 and level 2 are calculated when there's only one recovery facility per region, this is considered the centralized scenario. Then the impact of the location of the digester is analyzed when there's one recovery facility per municipality, this is considered the decentralized scenario. This situation represents the maximum energy that can be recovered when there's no transport level 2 in the territory and the recovery facility is located in the territory. To study the energy losses of the centralized

scenario and the impact of the location of the digester in the territory, a new scenario with multiple digesters in the region is created. These scenarios are presented in Tableau 5.1 .

Tableau 5.1 Description of different scenarios

Scenario	Description
A	<i>Centralized:</i> the organic waste is sent to the digester in the MAS municipality
B	<i>Decentralized:</i> the organic waste is sent to the digester in the center of each municipality
C	<i>Centralized:</i> the organic waste is sent to the digester in the ROS municipality
D	<i>Centralized to multiple digesters:</i> the organic waste is sent to the digester in the MAS or ROS municipalities

This systemic model is based on the relation between the territory dimension and the availability of municipal organic waste generated and collected. The Figure 5.2 represents the different levels of transport involved in the global process of organic waste collection.

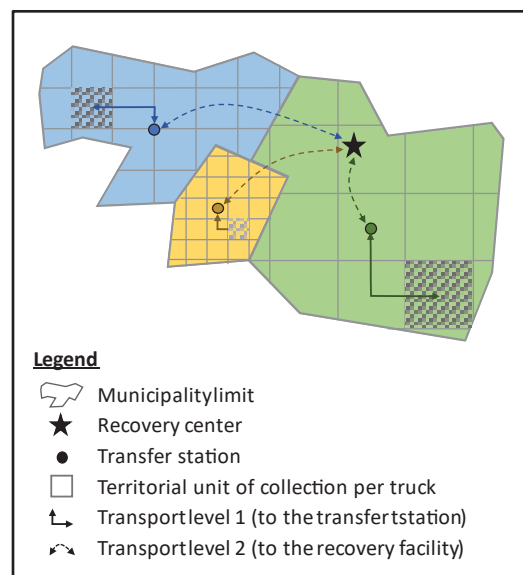


Figure 5.2 Different levels of collection and transport

The available energy of the process for each municipality is represented by *Energy available* (MJ/period) and it is represented by (5.1).

$$\begin{aligned}
 & \text{Energy available} \\
 & = \text{Energy}_{\text{generation CH}_4} - \text{Energy}_{\text{collection}} \\
 & \quad - \text{Energy}_{\text{transport level 1}} - \text{Energy}_{\text{transport level 2}}
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

5.3.1 Energy losses of collection and transport level 1

To calculate the distances and therefore the energy spent during collection and transport, this article presents a model where the area is divided in smaller squares where each small square represents the area of the collection of one truck. The breakdown of the area is represented by a symmetrical grid, and the anaerobic digester is located at the centre of the territory. This approach allows for calculating the total collected organic waste using the variable of the dimension of the territory.

To calculate the distance travelled by the truck in the collection and transport level 1 two different configurations are presented in Figure 5.3.

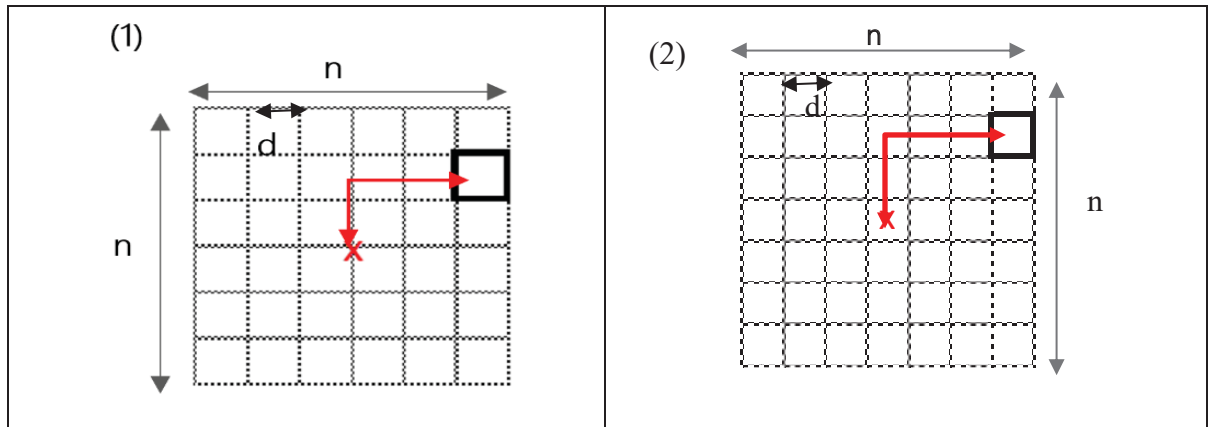


Figure 5.3 Configuration breakdown grid type (n x n) centred on the recovery facility with the cell unit of collection represented by d^2 dimensions for both configuration types: (1) even number of cell units in the grid to travel from the unit cell to the digester or (2) uneven number of units in the grid to travel from the unit cell to the digester

Where :

d is the dimension of each cell unit

The model is based on a cycle of collection or a defined period, so the energy balance and all the parameters are based on that period that can be adapted to the territorial situation. The equations that define the territorial breakdown are presented in (5.2) and (5.3).

$$n_{travel} = \frac{Waste_{total}}{C_{truck}} \quad (5.2)$$

Where:

n_{travel} : number of travels or collection cycles needed for the collection of the organic waste of the area (unit/period)

$Waste_{total}$: total collected waste of the area (t/period)

C_{truck} : payload of the truck used for the collection and transportation (t/truck)

$$n = \sqrt{n_{travel}} \quad (5.3)$$

Where:

n is the number of unit cells to cover the entire area and the cell unit has an area of d^2 .

The area of each unit cell is calculated considering the quantity of municipal organic waste available and the density of the population in the territory, and it is presented in (5.4).

$$d^2 = \frac{C_{truck}}{w_{hab} \times d_{pop}} \times 1000 \quad (5.4)$$

Where :

d^2 : area of each unit cell (km^2)

w_{hab} : quantity of municipal organic waste generated (kg/people/period)

d_{pop} : density (people/ km^2)

The dimension of each cell unit of the grid is represented in (5.5).

$$d = \sqrt{\frac{C_{truck}}{w_{hab} \times d_{pop}} \times 1000} \quad (5.5)$$

The distance for the collection of organic waste considers, on one hand, the capacity of the truck and, on the other hand, the availability of organic waste and the density of population and roads in the area. This distance of collection per cell unit DC_{truck} is presented in (5.6).

$$dc_{truck} = \frac{C_{truck}}{w_{hab}} \times \frac{d_{road}}{d_{pop}} \times 1000 \quad (5.6)$$

Where :

dc_{truck} : distance of collection per cell unit (km/period)

d_{road} : density of routes (km/km²)

Then, the total distance of collection for each scenario is calculated by multiplying the distance of each cell unit dc_{truck} by the number of cells considered ($n \times n$). This total distance of collection for each scenario DC_{total} is presented in (5.7).

$$DC_{total} = dc_{truck} \times (n \times n) \quad (5.7)$$

Where :

DC_{total} : total distance of collection (km/period)

This approach allows relating the dimension of the territory to the energy spent not only on the municipal organic waste management but also on the biomethane recovery system. Considering the dimension of the cell as a variable, this model calculates the distance of

collection and transport level 1 and the availability of municipal organic waste to be transformed in biomethane.

The total distance travelled one way on the transport level 1 represents the total distance connecting the centre of all the unit cells and the centre of the area, this distance is represented in (5.8) and (5.9). In this model, the recovery facility is located in the middle of the area.

$$\text{even} : DT_{tot.1way} = \left(\left(\frac{n}{2} \right) \times n^2 \right) \times d \quad (5.8)$$

$$\text{uneven} : DT_{tot.1way} = \left(\left(\frac{n}{2} \right) \times (n-1) \times (n+1) \right) \times d \quad (5.9)$$

Where :

$DT_{tot.1way}$ is the total distance travelled one way from the centre of each unit cell to the recovery facility (km/period).

The total distance travelled to go pick up the waste and then come back is represented in (5.10) and (5.11).

$$\text{even} : DT_{tot,2ways} = n^3 \times d \quad (5.10)$$

$$\text{uneven} : DT_{tot,2ways} = (n \times (n-1) \times (n+1)) \times d \quad (5.11)$$

Where :

$DT_{tot,2ways}$: total distance travelled from the centre of each unit cell to the centre of the grid or the recovery facility for the reference situation(km/period).

In the simplified systemic approach developed in this paper, the digester is situated in the centre of a grid-type structure, and this allows for calculating the total energy consumed for transport level 1 using $DT_{tot.2way}$ presented in (5.10) and (5.11) and $DC_{tot.2way}$ presented in (5.7). The

total energy consumed for collection and transport level 1 includes the embedded energy of the fuel used for the truck, in this case, is the fossil fuel consumption to produce 1 litre of diesel. These energies are presented in (5.12) and (5.13).

$$E_C = (FC_C \times DC_{total}) \times E_{diesel} \quad (5.12)$$

$$E_T = (FC_{T,i} \times DT_{tot,2way}) \times E_{diesel} \quad (5.13)$$

Where:

FC_C : fuel consumption of trucks on the collection mode (L/km)

$FC_{T,i}$: fuel consumption of trucks on transportation modes (L/km)

E_{diesel} : embedded energy in 1 litre of diesel (42.6 MJ/L; (Tanguy et al., 2017))

Some authors like (Pantaleo et al., 2013) and (Wright and Brown, 2007) include the tortuosity of the territory that represents the ratio of road length and the length of the arc connecting two adjacent nodes of the grid to account for the lack of linearity of some roads. But this factor is not included in this paper, because the actual values of density of population and roads are used, these values are based on the data of the province of Québec (Ministère des transports du Québec, 2022).

The values used in (5.12 and (5.13 are fuel consumption of collection (FC_C) of 0.84 L/km and fuel consumption in transportation mode ($FC_{T,i}$) for the transport level 1 of 0.61 L/km (Di Maria and Micale, 2013).

The gain of energy obtained by the production of biomethane is presented in (5.14).

$$E_{CH_4} = LHV_{CH_4} \times V_{CH_4} \quad (5.14)$$

Where:

E_{CH_4} : embedded energy in the biomethane (MJ/period)

LHV_{CH_4} : 36 MJ/Nm³ (International energy agency, 2020)

V_{CH_4} : volume of biomethane produced (Nm³/period)

LHV_{CH_4} represents the lower heating value of biomethane. This considers the energy value of the biomethane after the upgrade from the biogas, the product can be used without the need for any changes or transformations, and it can be used in natural gas vehicles.

5.3.2 Energy losses of transport level 2

The situation that represents the maximum energy that can be recovered is represented when there's no transport level 2 in the territory and the recovery facility is located in the municipality.

The second level of transportation of the organic waste, from the transfer centre to the recovery facility is studied considering the transportation using a truck different payload. The payloads studied are 9, 18 and 27 tons and fuel consumption $FC_{T,i}$ for transport level 2 are $FC_{T,9} = 0.25$ L/km, $FC_{T,17} = 0.28$ L/km and $FC_{T,27} = 0.30$ L/km (Franzese and Davidson, 2011)

In the simplified systemic approach developed in this paper, the digester is situated in the capital city of the municipality, and this allows for calculating the total energy consumed using this value as the distance presented in (5.10). The energy consumed for the transportation level 2 is presented in (5.15).

$$E_{transport\ level\ 2} = (FC_{T,i} \times DT_{level2,2\ ways}) \times E_{diesel} \quad (5.15)$$

Where:

$E_{transport\ level\ 2}$ is the energy spent on transportation level 2 (MJ/period).

$DT_{level2,2\ ways}$ represents the distance to the digester back and forth (km)

In this paper, the tortuosity factor (τ) is not included because the actual values of density of population and roads are used, these values are based on the data of the province of Québec (Ministère des transports du Québec, 2022).

5.3.3 Location of the recovery facility

To study the impact of the distance from the territory to the digester, the digester is located in the centre of each of the municipalities of the region to eliminate the losses dues to the transport level 2.

To analyze the impact of the location of the recovery facility two scenarios are studied. The scenario A includes only one recovery facility in the region, which represents the centralized scenario. Then, scenario B considers one recovery facility at the centre of each municipality, which represents the decentralized scenario, in this scenario the energy losses of transport level 2 are avoided.

5.4 Description of the study case: Montérégie, Québec, Canada

The province of Québec in Canada is divided in different administrative regions, one of them is the Montérégie. It covers a territory of 8764 km² with a population of 1433085 people, and it is divided in 13 municipalities. It is one of the southern provinces, and it presents a large array of density of population. The Figure 5.4 represents the geographical situation of the Montérégie region in Québec.

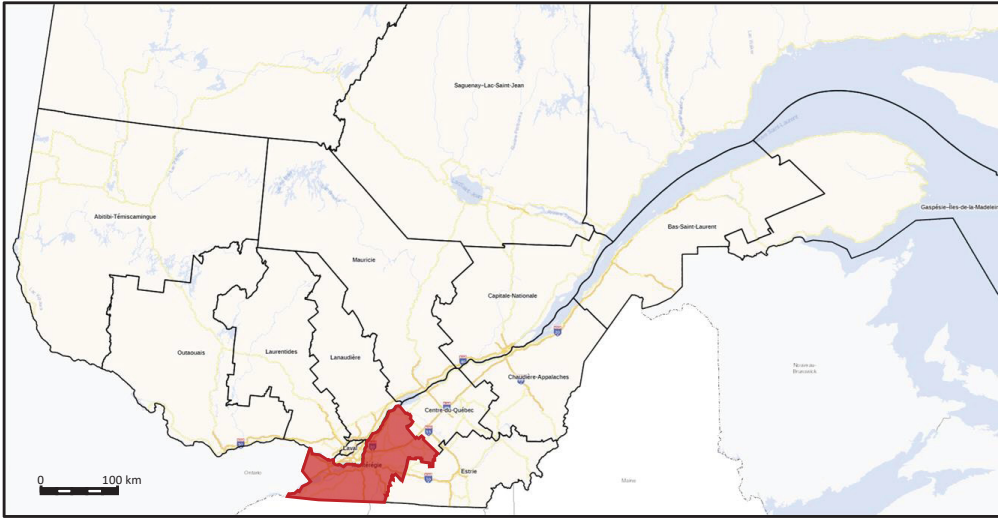


Figure 5.4 Location of the Montérégie region (in red) in the province of Québec, Canada
tiré de Gouvernement du Québec (2024)

The linear density of the population which is the number of people per unit of length, as defined in (5.16), this represents the availability of municipal organic waste per unit of length in the territory.

$$\text{Linear density of population} = \frac{d_{pop}}{d_{road}} \quad (5.16)$$

The data of the province of Québec, Canada (Ministère de l'environnement et la lutte contre les changements climatiques, 2022) is used to study the impact of urbanization level on biomethane recovery. The production performance of Québec considers only the digesters for the municipal solid organic waste without considering the municipal slurry data.

The data of different anaerobic digesters operated in real conditions in the province of Québec is used to calculate the volume of biomethane produced, this is shown in Figure 5.5.

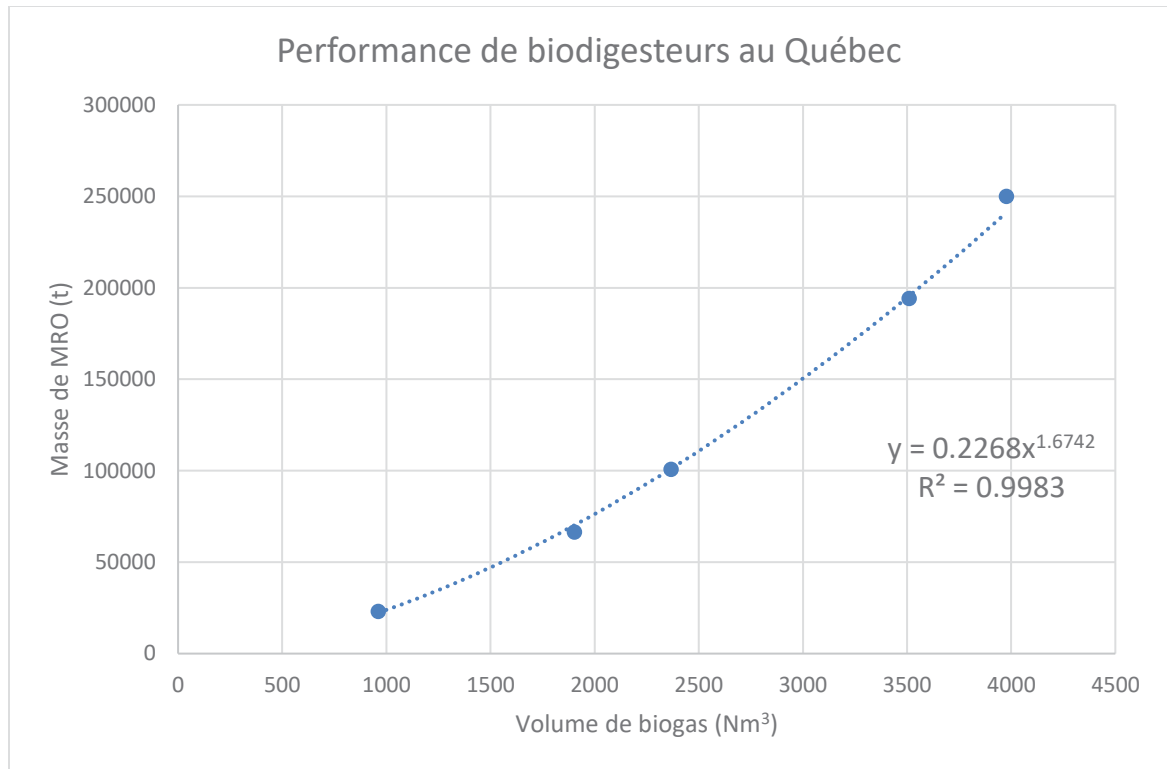


Figure 5.5 Production performance of biomethane production installations in Québec tiré de Ministère de l'environnement et la lutte contre les changements climatiques (2022)

In the case of collection and transportation level 1, the payload of the truck is 10 tons. In all cases, the collection cycle considered is one week. In the case of the transportation level 2, the payload of the truck C_{truck} is considered 9, 18 or 27 tons.

5.5 Results and discussion

The goal of this paper is to study the impact of the changes of the location of the digester, a systemic approach based on the energy balance of the process is used. First, the efficiency of the digester is calculated for the scenario A where only one digester is available in the region, in scenario A the energy losses of collection, transport level 1 and level 2 are calculated. Then, the efficiency of the digester is calculated for the scenario B where there's a digester in each municipality and there the energy losses of collection and transport level 1 are the only losses

to be considered. Finally, this approach is used to study the impact of the location of the digester and the use of two different digesters on the same region.

The distance of collection and transportation in the area is calculated considering that the collection truck has a payload of 10 tons, these distances depend on the population and road density of the territory. The territorial data is extracted from (Gouvernement du Québec, 2022) and (Gouvernement du Québec, 2021) , it's presented in Tableau 5.2.

Tableau 5.2 Municipalities and density in the administrative region of Montérégie in Québec, Canada

Municipality	population (people)	area (km ²)	road network (km)	Density (people/km ²)	road density (km/km ²)	linear density of population (people/km)
Acton (ACT)	15'965	579	440	28	0.76	36.3
Beauharnois- Salaberry (BSA)	67'899	468	720	145	1.54	94.2
Haut Richelieu (Le) (HRI)	122'526	936	1'399	131	1.49	87.6
Haut Saint Laurent (Le) (HSL)	22'200	1'157	988	19	0.85	22.5
Jardins de Napierville (Les) (JNA)	31'295	802	599	39	0.75	52.3
Longueuil (agglomération de) (LON)	434'711	282	1'963	1'542	6.96	221
Maskoutains (Les) (MAS)	89'575	1'303	1'158	69	0.89	77.4
Marguerite- D'Youville (MYO)	80'742	348	600	232	1.72	135

Municipality	population (people)	area (km ²)	road network (km)	Density (people/km ²)	road density (km/km ²)	linear density of population (people/km)
Pierre-De Saurel (PDS)	51'800	594	679	87	1.14	76.3
Roussillon (ROS)	184'980	372	1'120	497	3.01	165
Rouville (ROV)	37'680	482	487	78	1.01	77.3
Vallée du Richelieu (La) (VRI)	132'315	587	1'070	225	1.82	124
Vaudreuil- Soulanges (VSO)	161'397	854	1'518	189	1.78	106

The results in Tableau 5.2, show that the dimension of the cell and the population density of the municipality are related with the linear density, which represents that when an area has a bigger dimension it also has a bigger linear density depending on the dimension of the cell. Moreover, these results show that the municipalities with a bigger linear density have more availability of municipal organic waste to be collected and transported to the digester.

5.5.1 Losses of energy depending on the different levels of transport

. The energy losses of collection and transport levels 1 and 2 are calculated for the different municipalities and different payloads. The results in Figure 5.6 show the energy lost in collection and transportation level 1 and level 2 for the scenario A, with only one digester in the region, that is located in the municipality of MAS.

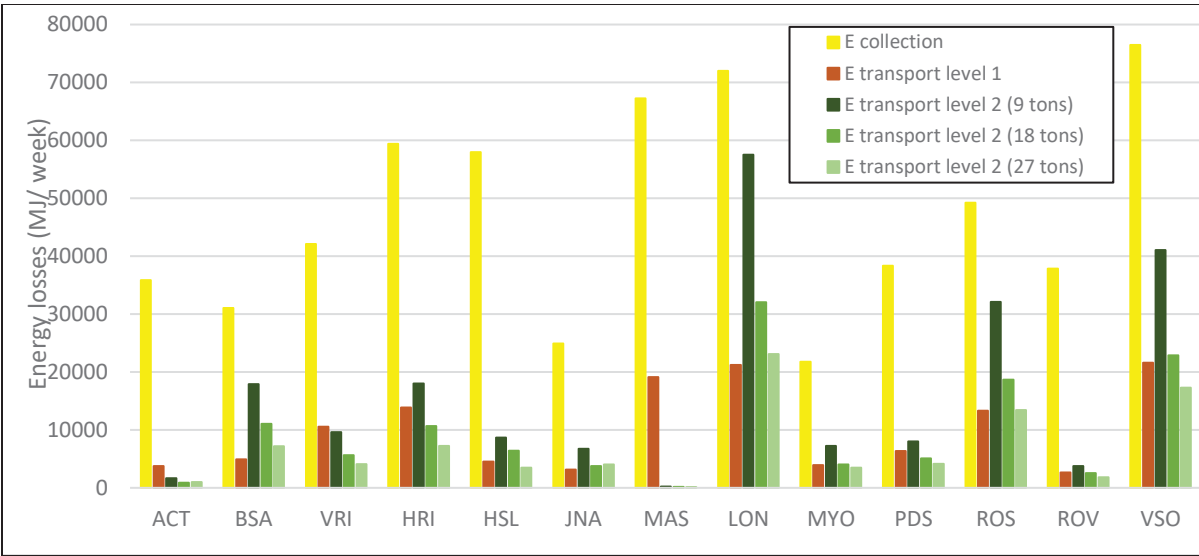


Figure 5.6 Energies of collection and transportation level 1 and level 2 for the scenario A

The energy spent on the collection is more important than the energies transportation level 1 or level 2. The energy spent on collection and transport level 1 depends on the distance traveled and the area size of the municipality and the number of trucks needed to transport the municipal organic waste available.

Results in Figure 5.6 show that the energy losses of transport level 2 diminish when transporting the municipal organic waste with a truck with a bigger payload. Therefore, the percentage of energy losses for the transport level 2 is calculated when using a truck with a 27-ton payload.

For the municipalities with higher energy losses spent on collection, it can be considered to add another digester in the municipality to diminish the energy losses of collection and transport level 1.

5.5.2 Comparison of different scenarios and digester location

The results in Tableau 5.3 show the energy of the recovery process and the percentage of energy losses for each municipality when considering scenarios A and B. Scenario A

represents the centralized scenario which includes the energy losses of collection and transport level 1 and also transport level 2, and scenario B represents the decentralized scenario which includes a digester in each municipality and by doing so, only the energy losses of collection and transport level 1 are considered.

Tableau 5.3 Energy losses of scenarios A and B

MUNICIPALITY	WASTE	ENERGY			
(code)	(t/week)	Potential (MJ/week)	Collect (MJ/week)	Transport 1 (MJ/week)	Transport 2 (MJ/week)
			(% of potential)	(% of potential)	(% of potential)
				Recovery Sc.B (MJ/week)	Recovery Sc.A (MJ/week)
				(% of potential)	(% of potential)
scénarios		A (centralised)			to MAS →
		B (decentralised)			
			→		
Acton (ACT)	17.6	4'244	35'878	3'775	983
			>100%	89.0%	23.2%
				-35'409	-36'392
			<0%	<0%	
Beauharnois- Sallaberry (BSA)	74.7	16'496	31'067	4'937	7'182
			>100%	29.92%	43.5%
				-19'507	-26'689
			<0%	<0%	
Haut Richelieu (Le) (HRI)	135	43'225	59'422	13'857	7'220
			>100%	32.1%	16.7%
				-30'055	-37'275
			<0%	<0%	
Haut Saint-Laurent (Le) (HSL)	24.4	4'244	57'937	4'525	3'471
			>100%	>100%	81.8%
				-58'219	-61'690
			<0%	<0%	
Jardins de Napierville (Les) (JNA)	34.4	4'244	24'898	3'174	4'043
			>100%	74.8%	95.3%
				-23'828	-27,871
			<0%	<0%	

MUNICIPALITY	WASTE	ENERGY			
(code)	(t/week)	Potential (MJ/week)	Collect (MJ/week) (% of potential)	Transport 1 (MJ/week) (% of potential) Recovery Sc.B (MJ/week) (% of potential)	Transport 2 (MJ/week) (% of potential) Recovery Sc.A (MJ/week) (% of potential)
scénarios		A (centralised)	to MAS →		
		B (decentralised)			
Longueil (Agglom. de) (LON)	478	281'526	71'984	21'200	23'074
			25.6%	7.53%	8.20%
				188'342	165'268
Maskoutains (Les) (MAS)	98.5	43'225	67'265	19'122	101
			>100%	44.2%	0.02%
				-43'162	-43'264
Marguerite- D'Youville (MYO)	88.8	16'496	21'761	3'907	3'496
			>100%	23.7%	21.2%
				-9'172	-12'668
Pierre-De Saurel (PDS)	57.0	16'496	38'359	6'366	4'127
			>100%	38.6%	25.0%
				-28'22as9	-32'356
Roussillon (ROS)	203	91'248	49'219	13'333	13'437
			53.9%	14.6%	14.7%
				28'696	15'259
Rouville (ROV)	41.4	16'496	37'860	6'727	1'819
			>100%	40.8%	11.0%
				-28'091	-29'910
Vallée du Richelieu (La) (VRI)	146	43'225	42'088	10'562	4'074
			97.4%	24.4%	9.42%
				-9'426	-13'499
Vaudreuil-Soulange (VSO)	178	91'248	76'488	21'623	17'290
			83.8%	23.7%	19.0%
				-6'862	-24'153
				<0%	<0%

The results in Tableau 5.3 show that the municipalities with a bigger availability of municipal organic waste and a big territory have a bigger percentage of losses of collection and transport level 1 and in these cases to diminish the energy losses, having multiple digesters in the municipality can be considered.

In the cases of the bigger municipalities with a higher availability of organic material where the percentage of energy losses of collection and transport level 2 are important, the use of a digester in a nearby municipality should be considered.

There are two different situations to consider when allocating the organic municipal waste facilities to diminish the energy losses of transport level 1 or level 2. So, there's a comprise to be considered between the proximity of the municipality to the transfer station and to the digester.

5.5.3 Allocation of municipal organic waste

To diminish the energy losses of transport level 2, a new scenario is created. Scenario C represents the case where a second digester is located in the municipality of ROS and this represents the centralized scenario when the organic waste is sent to the ROS digester. Then the scenario D is created where the organic waste is sent to the digester that is closer to each municipality's transfer center, this represents the mix between scenarios A and C. The Figure 5.7 shows the energy losses for the transportation level 2 when the digester is located in different municipalities.

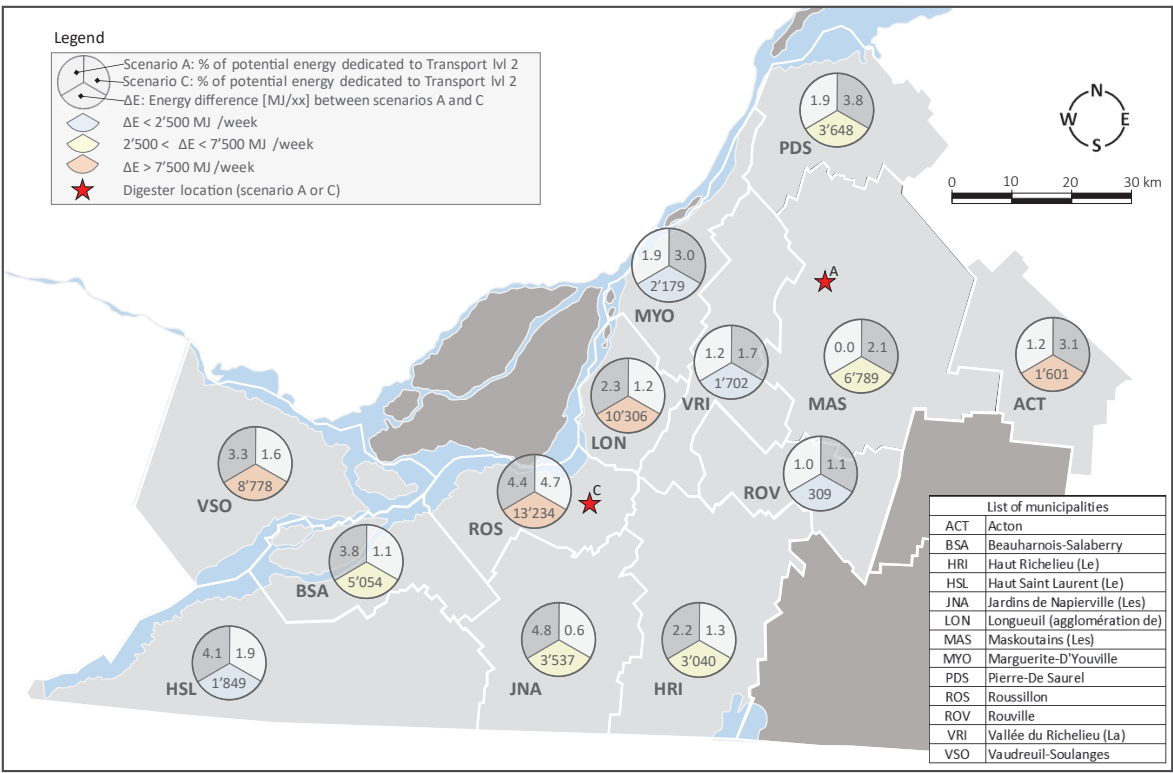


Figure 5.7 Study of allocation of organic waste and location of the digester in the Montérégie region

The difference of energy losses between scenarios is also shown in Figure 5.7, when this difference is small, there's not a big impact on changing the digester to which the organic waste is transported. In those cases, there's not a big impact on which of the digester is used and that the municipal organic waste can be rerouted with a little energy impact. Additionally, the results in Figure 5.7 show that there's a relation between the availability of organic waste and the difference of energy losses of transportation level 2 between scenarios. The impact of the difference of location of digester on a municipality increases with the availability of organic municipal waste in the municipality.

The total energy losses of transport level 2 for all these scenarios are presented in Tableau 5.4.

Tableau 5.4 Results of energy losses of transport level 2 for scenarios A, C and D

Parameters	ENERGY		
	Transport 2 (MJ)		
	(% of potential)		
	<i>scenario A</i> <i>centralised to MAS</i>	<i>scenario C</i> <i>centralised to ROS</i>	<i>scenario D</i> <i>mixed MAS and ROS</i>
Total losses transp level 2 (MJ/week)	90'317	60'117	44'519
% of potential	13.4%	8.94%	6.62%
Fuel consumption (l/week)	2'120	1'411	1'045
GHG emissions (t CO ₂ /year)	298	198	147

The results in Tableau 5.4 show that the location of the recovery facility influences the energy losses of the global process of energy recovery. The change of the digester from MAS to ROS for the centralised scenario to one unique digester represents 0.67% of the potential energy benefit but when considering the energy losses of scenario D, the percentage of energy losses of scenario D represent 49% of the scenario B and 72% of the scenario C. The fuel consumption of transport level 2 is calculated for each of these scenarios considering the embedded energy in 1 litre of diesel (42.6 MJ/L; (Tanguy et al., 2017)) and the GHG emissions are considered 2.7 kgCO₂ per liter of diesel consumed (Ressources naturelles Canada, 2014). Considering the fuel consumption and the GHG emissions per year, the economic and environmental costs of the change of the digester location can be calculated.

When considering the multiple digester situation in the region, there's a compromise to be made between the energy losses and the investments of having more than one digester per municipality, the cost of the industrial infrastructure in the area and the investments or disturbance of the transport.

Many countries had developed new technologies for smaller digesters that can be installed (Chitaka and Schenck, 2023) without compromising the efficiency of the biomethane recovery.

Even if the technology is available to the biomethane recovery to install smaller digesters, the social acceptability of the anaerobic digester is a difficult step for many territories (Calisto Friant et al., 2020).

5.6 Conclusion

The model created in this paper allows studying the chain's service area size of biomethane recovery when considering the energy losses of collection and transportation of the organic waste at different levels and the energy gains of the biomethane conversion. However, different types of energy losses in transportation are presented: first, the energy losses of collection and transport level 1, which represents the collection and transport of the municipal organic waste from the territory to the transfer station and then, the energy losses of transport level 2 from the transfer station to the recovery facility. The location of the transfer station and the recovery facility are related to the consumption of fuel, so this influences the energy losses. This highlights the fact that the distance between the territory, the transfer station and the biomethane recovery facility play a key role in the energy losses of the energy global chain of recovery.

Moreover, the results also show that the concentration of population and availability of organic waste impact the losses of collection and transport level 1. Additionally, results also show that having two available recovery facilities of municipal organic waste in the region can be used as a method to reduce energy losses of transport level 1 on the denser territories. The energy losses of transport level 2 are related to the distance to the recovery facility and the quantity of organic material in the municipality, but the impact for each municipality depend on the territorial and spatial characteristics. So municipal officers should consider the location of the transfer station and the allocation of organic materials to study the energetic benefits of the global chain of biomethane recovery for the territory's characteristics. By the same token, the impact of noise, traffic and economic investment in the area should be also evaluated for the location of the digester.

The approach used for the calculations of energy spent in the transport represents a conceptual approach that can be generalized to the rest of the territory. Other methodologies using computational tools like GIS can be more precise, but the methodology used in this article allows to compare different scenarios.

It has been demonstrated that a compromise between the distance from the territory to the recovery facility and the allocated quantity of organic waste crucial to improve the energy recovery of the process. Although it is important to mention that the speed of transportation, the conditions, and the steepness of the roads impact the energy calculations of the transportation methods. The locations of the recovery facilities in this article were decided, as an example; nevertheless, the study provides a foundation for further investigations on the impact of the location of the recovery facility.

CHAPITRE 6

DISCUSSION GÉNÉRALE

Ce chapitre présente une synthèse des travaux concernant les trois volets du projet de recherche. Dans un premier temps, les résultats sont mis en perspective puis, dans un deuxième temps, ils sont positionnés dans le cadre conceptuel plus large dans lequel le projet s'inscrit. Dans un troisième temps, les principales perspectives de recherche émergeant de ce projet de recherche sont présentées.

6.1 Retour sur les travaux de recherche

À travers l'étude des différentes étapes de la gestion intégrée des MR, le travail de recherche a permis de positionner la dimension territoriale liée à l'aspect technologique de la chaîne globale de valorisation des MR. Les résultats des différents volets sont d'abord mis en perspective et ensuite, l'approche globale proposée dans ce travail de recherche est discutée.

6.1.1 Mise en perspective des résultats

L'analyse de la structure du transport menée à l'échelle territoriale, à échelle micro (chapitre 3) et à échelle macro avec une perspective technologique (chapitres 4 et 5) amène à positionner les résultats de la performance de la valorisation des MR en regard de la complexité de la gestion et valorisation des MR. L'approche systémique de la chaîne de valorisation des MR est considérée pour obtenir les résultats. En effet, cette approche tient compte des différentes activités de la chaîne de valorisation des MR qui consomment de l'énergie comme la collecte et le transport, mais aussi les activités qui génèrent de l'énergie comme la valorisation des MR. D'après les résultats du chapitre 3, le type de structure de transport peut également influencer la performance énergétique de la chaîne globale de valorisation. Pour approfondir la compréhension de la relation entre la structure de transport et la dépense énergétique, la hiérarchisation des niveaux de transport est appliquée à la collecte et au transport des MR

issues de la collecte municipale comme moyen pour diminuer la consommation d'énergie. La théorie constructale a été utilisée comme base pour établir les quatre scénarios étudiés.

Les scénarios étudiés prévoient une méthode alternative à la collecte porte-à-porte communément utilisée, cette nouvelle structure prévoit la participation citoyenne. Au premier niveau chaque personne doit prendre 10 kg de MR et le transporter jusqu'au point de collecte. Après au deuxième niveau, une bicyclette est utilisée pour transporter 100 kg jusqu'au nouveau point de collecte ; au troisième niveau un camion de 1,5 tonne est utilisé pour collecter et transporter jusqu'au nouveau point de collecte et au quatrième niveau un camion de 10 tonnes continue la collecte. L'utilisation de quatre méthodes de transport différent est envisagée pour diminuer la consommation d'énergie.

Les résultats démontrent que la structure hiérarchique avec plusieurs niveaux et plusieurs méthodes de transport réduit la consommation d'énergie, lorsque comparée à la collecte porte-à-porte. Il est aussi démontré que la charge transportée, la méthode de transport utilisée, le nombre d'arrêts à chaque niveau et l'énergie dépensée à chaque arrêt affectent aussi l'énergie associée à la structure de transport.

L'aspect technologique de la chaîne de valorisation est ensuite observé pour étudier la performance énergétique de la chaîne globale. Les chapitres 4 et 5 incluent un modèle de découpage du territoire basé sur une approche systémique de la collecte et du transport des MR, où les MR sont envoyés au centre du territoire. Le territoire est découpé selon différentes cellules unitaires que représentent les distances parcourues pour la collecte et le transport des MR. La Figure 6.1 présente les bases du modèle.

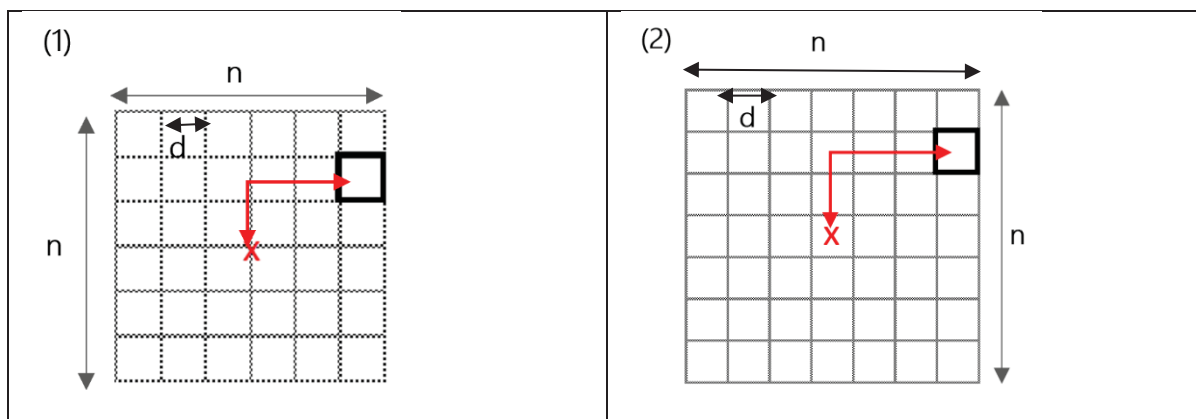


Figure 6.1 Modèle du maillage de type $(n \times n)$ centré dans le centre de récupération avec la cellule unité représentée par la dimension d^2 pour les deux types de configuration (1) pour les chiffres pairs de cellules unitaires pour aller de la cellule unitaire jusqu'au digesteur et (2) pour les chiffres impairs de cellules unitaires pour aller de la cellule unitaire jusqu'au digesteur

Les résultats du chapitre 4 montrent que la densité linéaire de population (hab/km) détermine les dimensions des 'mailles' du territoire et avec les paramètres calculés selon la méthodologie, les distances à parcourir pour la collecte et le transport des MR sont aussi calculées. Quatre scénarios sont étudiés selon la densité du territoire et les résultats montrent que les distances de transport des MR sont toujours supérieures à la distance de collecte pour le même scénario. Les résultats démontrent aussi que pour chaque scénario, les gains d'énergie de la chaîne globale de valorisation augmentent avec la quantité de matière jusqu'à un maximum. Après ce maximum, l'énergie récupérée diminue jusqu'à un point où le bilan énergétique de la chaîne globale de valorisation est négatif, cela représente que le processus perd de l'énergie. Les résultats mettent aussi en évidence que le pourcentage de récupération des MR influence aussi le maximum d'énergie qui peut être récupérée dans le territoire. Parallèlement, ce maximum d'énergie est lié à une quantité maximale de MR qui peut être valorisée dans un même centre de valorisation. Les résultats démontrent que la technologie de valorisation des MR doit être choisie selon les caractéristiques du territoire pour que le bilan énergétique soit toujours positif et ainsi assurer le gain d'énergie.

Le chapitre 5 intègre plusieurs niveaux de transport présents dans le territoire dans la chaîne de valorisation des MR : la collecte des MR, un premier niveau de transport à l'intérieur du territoire pour le transport des MR au centre de transfert et un deuxième niveau de transport à l'extérieur du territoire pour transporter les MR du centre de transfert au centre de valorisation. Les résultats étudient l'impact des pertes d'énergies dues au transport des MR quand le digesteur n'est pas localisé dans le territoire de collecte des matières. Plusieurs scénarios sont étudiés : un scénario centralisé pour la valorisation des MR, où toutes les MR du territoire sont envoyées vers le même centre de valorisation dans la région et un autre scénario où la valorisation est réalisée à proximité.

Les résultats montrent que pour les territoires plus denses ou plus éloignés, l'installation d'un centre de valorisation à proximité a un impact bénéfique pour diminuer les pertes d'énergie de collecte et transport de niveau 1. Ainsi la localisation d'un nouveau centre de valorisation à proximité diminue les pertes de transport de niveau 2 et plusieurs territoires voisins peuvent aussi transporter les MR à ce nouveau centre de valorisation et diminuer les pertes de transport de niveau 2.

6.1.2 Retour sur l'approche développée

L'approche développée est basée sur le bilan énergétique et permet d'étudier la chaîne globale de valorisation de MR. Il s'agit d'une approche systémique basée sur l'étude énergétique de chaque étape du processus, les pertes énergétiques dues à la collecte et le transport de niveau 1 (à l'intérieur du territoire jusqu'au centre de transfert), les pertes énergétiques liées au transport des MR de transport de niveau 2 (à l'extérieur du territoire jusqu'au centre de valorisation) et les gains énergétiques associés à la valorisation des MR. La complexité des caractéristiques territoriales des paramètres du système est un frein à l'application directe du bilan énergétique et traduit la complexité des systèmes étudiés. Cette complexité se retrouve à deux niveaux : (i) au niveau du transport, la structure et les méthodes de transport utilisées et (ii) au niveau technologique et opérationnel, dont la méthode de valorisation et l'allocation des MR.

La structure hiérarchique du transport permet des bénéfices énergétiques par l'utilisation de différents niveaux de collecte et méthodes de transport, cette structure est basée sur la théorie constructale (Trancossi, 2016). Les bénéfices énergétiques sont liés aux caractéristiques territoriales et principalement à la densité de population. Ainsi l'utilisation d'une structure de collecte et transport hiérarchique des MR en milieu urbain pourrait être envisagée comme méthode pour diminuer les coûts énergétiques.

L'analyse menée au chapitre 4 permet l'intégration des aspects technologiques et leur application dans le cadre de la chaîne énergétique globale de valorisation de MR. Ainsi pour un territoire déterminé et pour une technologie de valorisation établie, il y a un maximum d'énergie qui peut être obtenue. Ce maximum d'énergie est associé à une quantité déterminée de MR à valoriser. Ainsi, l'utilisation du bilan d'énergie de la chaîne globale de valorisation pourrait être envisagée comme une méthode pour la conception des centres de valorisation et des choix opérationnels des procédés de la gestion intégrée des MR.

Enfin, la méthodologie développée permet d'intégrer les caractéristiques territoriales et les aspects technologiques de la valorisation. L'intégration de ces deux aspects permet d'associer l'aspect de la distribution des MR à valoriser à la localisation des centres de valorisation pour obtenir des bénéfices énergétiques. L'approche proposée pour l'évaluation de la gestion des MR à différentes échelles permet de montrer la pertinence d'une approche considérant plusieurs étapes et aspects du processus de valorisation. Une des forces de l'approche proposée est qu'elle nécessite peu de données : seulement les volumes de flux, densités territoriales, distances et modes de transport. Si ces données ne sont pas actualisées, la 'taille' des mailles et les distances à parcourir pour la cellule unitaire vont être mal représentées. Cependant, les distances du territoire au centre de valorisation utilisées pour le calcul des pertes dans le transport des MR pour la valorisation sont plus facilement calculées

En revanche, la justesse de ces données peut limiter l'approche, mais dans tous les cas, une évaluation environnementale précise nécessite des données qui reflètent la réalité de la situation. Le modèle proposé pour le découpage territorial permet en partie de lever ce frein pour ce volet, mais le choix des filières à valoriser et des données technologiques sont un paramètre clé de cette approche.

6.2 Filières de valorisation

Les résultats du travail de recherche mettent en évidence le compromis entre les aspects territoriaux et technologiques dans la chaîne globale de valorisation des MR. Des performances non optimales dans certaines parties du processus permettent d'atteindre une performance globale acceptable. Les performances des systèmes de transport dans de différents contextes territoriaux (Trancossi, 2016) et de récupération de biogaz par des digesteurs anaérobies (Kumar and Samadder, 2020) ont été largement étudiées. Mais, présentement, le processus global pour la distribution des MR et l'installation des centres de valorisation dans le territoire ne prend pas compte de l'optimisation des processus en amont selon la technologie utilisée (Sarker et al., 2019). Ainsi, il devient envisageable d'étudier les performances des différents processus comme la collecte, les différents niveaux de transport et l'aspect technologique d'une manière indépendante, mais la performance de valorisation de la filière tient compte des performances de tous les processus de la chaîne pour favoriser un fonctionnement adéquat du système à tous les niveaux du processus global.

Des compromis entre les différents aspects du système peuvent être envisagés, comme par exemple une performance optimale au niveau du transport dans un territoire et dans un autre territoire les aspects technologiques de la valorisation peuvent être optimisés. Le chapitre 3 met en évidence l'impact de la structure du transport pour la performance énergétique de la collecte et le transport des MR. Selon les résultats, cet impact est encore plus important pour les territoires plus densément peuplés, comme les villes et centres urbains (Kûdela et al., 2019). Après le chapitre 4 s'attaque à l'aspect technologique de la valorisation et intègre l'aspect

territorial à quantité de MR à valoriser pour obtenir une performance énergétique bénéfique selon les données technologiques.

L'approche développée dans ce projet de recherche analyse les différentes dépenses énergétiques de la chaîne globale et permet d'identifier les changements à apporter aux différentes parties du système, en fonction de leur localisation et leurs caractéristiques territoriales. Afin de pouvoir planifier le processus de valorisation pouvant conduire à un bénéfice énergétique, la localisation des centres de valorisation et la distribution des ressources ont été étudiées auparavant utilisant des moyens mathématiques et des méthodes computationnels complexes (Wu et al., 2015). La simplicité de l'approche utilisée permet d'analyser les différentes structures de transport avec des données du territoire, sans avoir besoin de méthodes computationnelles.

L'approche systémique de cette méthode permet une meilleure intégration lors de la planification des activités de gestion des différents décideurs. De plus, les décideurs peuvent étudier les impacts des changements proposés, en termes de traitement, de modes de collecte et de transport ou des types de produits ou filières à valoriser. L'adaptabilité de l'approche peut être bonifiée par des approches existantes, selon les besoins ou les moyens du décideur, comme par exemple, l'utilisation de modèles plus complexes pour l'optimisation de la collecte ou du transport.

6.3 Perspectives de recherche

Le travail de recherche mené est la construction d'un outil basé sur le bilan énergétique de la chaîne globale de la valorisation à partir des MR provenant de la collecte municipale.

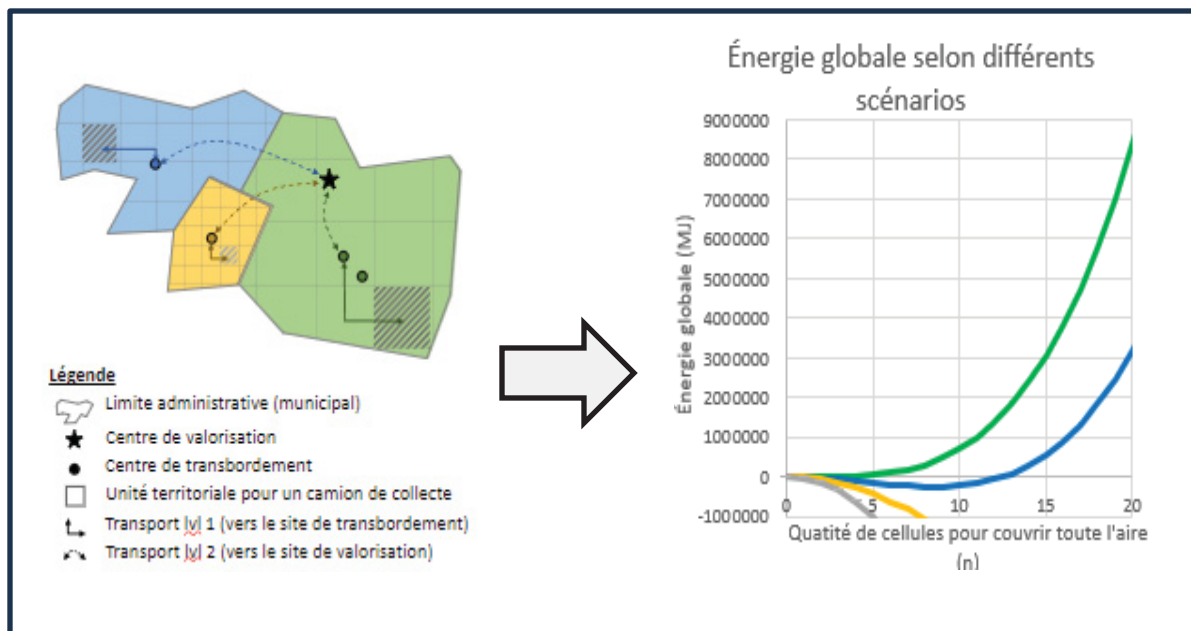


Figure 6.2 Diagramme de l'outil développé

Où chaque maille représente l'unité territoriale pour un camion de collecte et de là, les MR sont transportées vers le centre de valorisation. Pour élargir cette approche, trois perspectives de recherche sont identifiées, les deux premières proposent deux axes pour modifier et augmenter la performance opérationnelle de la démarche, étudiant des initiatives concernant l'amélioration de la structure de transport de gestion des MR et la diminution des pertes énergétiques liées au transport. La dernière propose d'élargir le regard sur les cadres d'évaluation pour la localisation des centres de valorisation des MR pour analyser la performance globale du système de récupération.

6.3.1 Développement de la structure de collecte et transport

Cet aspect concerne l'énergie consommée par les méthodes de transport, elle dépend du type de combustible utilisé et les données concernant les différents types de combustible. Plusieurs méthodes de transport sont disponibles et l'étude des transports adaptés au territoire pourrait être poursuivie pour diminuer les dépenses énergétiques. Il s'agirait d'utiliser les principes de la hiérarchisation des transports (Zhou et al., 2007) et de choisir chaque niveau de transport afin d'appliquer la théorie et les conclusions issues du travail de recherche présenté. Pour cela,

il serait envisageable de choisir des méthodes de transport adaptées au territoire qui permettront de diminuer la consommation d'énergie, mais aussi qui permettent une adaptabilité aux conditions spatiales (Vu et al., 2020).

La chaîne globale de valorisation de MR inclue plusieurs niveaux hiérarchiques et chaque niveau peut être étudié d'une façon indépendante. Ainsi en fonction des caractéristiques du territoire, d'autres technologies plus adaptées au territoire comme des véhicules motorisés de petite taille peuvent être utilisées selon les différents niveaux de transport et les quantités de MR à transporter (Pinto et al., 2018).

Avec ces données, les gestionnaires municipaux chargés de la collecte et du transport des MR pourront établir la structure de collecte et de transport et pourront comparer les gains énergétiques entre différentes structures de transports qu'ils pourront définir. Les calculs pourront être réalisés avant que les changements soient mis en place, plusieurs méthodes de transport sont utilisées dans les centres urbains en remplacement des véhicules qui fonctionnent à combustible (Anderluh et al., 2017). De plus, une dimension temporelle peut être ajoutée, car les méthodes de transport peuvent être adaptées et changées au fur et à mesure que les performances technologiques des transports sont améliorées.

6.3.2 Approche territoriale intégrée de la valorisation des matières résiduelles

Le travail de recherche a été développé de manière à fournir une aide à la planification territoriale intégrant toutes les dimensions considérées dans ce travail (territoire, environnement, structure de collecte et de transport). La dimension territoriale relie aussi les aspects technologiques de la valorisation, car le gain d'énergie potentielle de la valorisation des MR dépend de la quantité, du type et de la composition de la MR collectée dans le territoire (Kong et al., 2018).

L'outil pourrait être intégré à un logiciel de SIG, utilisé par les professionnels de développement territorial tant publics que privés (Sanchuan et al., 2019). Sur une carte du territoire, les informations associées seraient, entre autres, les acteurs, les flux et leur impact. Les outils computationnels sont en mesure de calculer plus rapidement les données de distances parcourues, de façon à pouvoir associer des scénarios de planification, développés sur la cartographie du territoire, à leurs performances. De cette manière, il est possible d'anticiper les conséquences d'un changement sur le territoire, ou d'identifier des zones où les performances qui génèrent un bénéfice énergétique. Il serait également pertinent d'y intégrer une étude dynamique, afin d'avoir une vision temporelle de l'évolution du territoire. Dans le cas de l'approche développée dans ce projet de recherche il s'agit d'une démarche conceptuelle permettant la généralisation à l'ensemble du territoire. L'outil permet de simplifier l'analyse pour être généralisée à plusieurs échelles de territoire ; par exemple, à l'échelle de la province l'outil peut être utilisé pour avoir une vision générale et comparer les différentes municipalités du territoire, tandis qu'à l'échelle du voisinage l'exactitude devient plus importante et l'outil peut intégrer l'utilisation du SIG.

La visualisation des éléments du territoire et de leur performance ouvre des possibilités quant à la prise en compte des potentielles synergies qui pourraient se déployer à de nouvelles échelles, ou entre de nouvelles filières de valorisation. La performance de chaque centre de valorisation considère la quantité de MR à valoriser tenant compte des gisements des MR dans le territoire, incluant la localisation du centre de valorisation à l'énergie dépensée lors de la collecte et le transport de cette quantité de matière (Wright and Brown, 2007). Selon les performances technologiques des différentes méthodes de valorisation, la quantité de MR à collecter et à transporter pourrait s'avérer différente et ainsi la performance énergétique du processus global pourrait changer. Ainsi la dimension territoriale de la valorisation influence non seulement les données de densités et de routes du territoire, mais aussi la performance globale de la valorisation des MR dans le territoire. Le modèle développé propose un découpage en damier du territoire pour calculer les dépenses énergétiques de collecte et transport, cependant une méthode computationnelle du type de géolocalisation intégrée pourrait générer des données de consommation d'énergie plus précises.

Une des forces de la cartographie SIG est de pouvoir croiser les domaines d'analyse d'un territoire tenant compte de la diversité des données existantes. Il serait possible de mettre l'emphasis sur la dimension territoriale comme les résidences et l'infrastructure routière, permettant de révéler des interactions de la population et l'aspect transport du territoire, tout en développant les interactions du territoire selon la structure routière déjà existante (Tirkolaee et al., 2020). Ainsi cette perspective de recherche propose de développer un modèle qui permettrait d'assurer du bénéfice énergétique de la valorisation des MR dans le territoire et des systèmes, tenant compte des données technologiques de la valorisation, mais incluant aussi les données spatiales du territoire.

6.3.3 Adaptation du cadre d'évaluation

L'intégration de la dimension structurelle dans un cadre d'évaluation plutôt classique (impact environnemental, récupération des MR) proposée dans ce travail montre que le bilan énergétique de la chaîne globale de valorisation peut être utilisé comme indicateur de la performance du système. Elle a également mis en valeur les bénéfices qu'il pourrait y avoir à élargir la vision d'une performance liée uniquement à un seul aspect de la chaîne de valorisation. Par ailleurs, de nouveaux paradigmes basés sur l'économie circulaire ou les symbioses industrielles pourraient appeler à repenser l'organisation de la gestion, les filières à valoriser et les systèmes de valorisation des MR (Weber, 2023).

La récupération de matériaux par la valorisation des MR est un modèle encouragé dans la société actuelle, mais dans le cadre de l'économie circulaire, les habitudes de consommation des produits pourraient être revisitées. Ainsi, dans une future société qui vise comme objectif 'zéro déchet', les nouveaux cadres de pensée pourraient servir de point de départ au développement d'une nouvelle manière de penser les systèmes de valorisation (Li et al., 2021). Ainsi de nouvelles étapes à la chaîne de valorisation des MR pourraient s'ajouter ou elles

pourraient se développer et changer. L'outil développé dans ce projet de recherche basé sur le bilan énergétique peut intégrer cette flexibilité de la chaîne globale de valorisation.

Cette approche est basée sur le bilan énergétique associé à une filière en particulier, mais dans le contexte de valorisation, l'exergie considérée comme la valeur liée au travail réutilisable du produit final peut aussi servir comme indicateur de la chaîne globale de valorisation. Les études d'énergie et exergie du processus global permettent d'analyser les pertes d'exergie de la chaîne globale (Vilardi et al., 2020).

La conception de ce nouveau cadre d'analyse devrait être également vue comme l'occasion d'intégrer différents enjeux absents des cadres actuels ou de corriger des enjeux présents dans les systèmes de valorisation. La valorisation est une responsabilité partagée, par exemple la récupération des MR dépend du citoyen et les systèmes de valorisation dépendent entre autres de la technologie actuelle, ce qui met en évidence que l'acceptabilité sociale de la valorisation joue un rôle pour la gestion intégrée des MR. Ainsi, l'outil développé devrait avoir comme objectif d'accompagner et de faciliter la flexibilité de la valorisation des MR (Calisto Friant et al., 2020).

CONCLUSION

La récupération des MR inclut plusieurs étapes ou activités et la chaîne de valorisation est formée des activités de collecte et de transport des MR jusqu'au centre de valorisation ainsi que des activités associées à la valorisation. La performance énergétique de la chaîne de valorisation est principalement évaluée selon deux angles : la structure spatiale (agencement du territoire) et le procédé technologique de valorisation. Le premier aspect permet rendre compte des pertes énergétiques associées aux caractéristiques du territoire et des gisements de MR ; il met en évidence les améliorations possibles. Le second aspect permet d'estimer les gains énergétiques de la valorisation des MR, ils sont associés à la technologie et aux procédés utilisés. Dans ce contexte, une approche systémique est développée, mettant en regard la structure du réseau de collecte et du transport et les gains énergétiques qu'il apporte. Cet outil permet de définir les zones du territoire où la chaîne de valorisation de MR est énergétiquement favorable. L'objectif général de ce projet était de développer des outils et de méthodes visant à faciliter les choix de solutions dans une perspective de développement durable de la gestion intégrée des MR.

Le premier volet de ce travail concerne la construction d'un cadre d'analyse appliqué sur la théorie constructale, permettant d'établir des scénarios pour la hiérarchisation du système de collecte et de transport des MR, permettant d'établir des liens entre la configuration hiérarchique du système (dimension structurelle) et ses bénéfices (dimension environnementale). La construction des scénarios proposés repose sur les caractéristiques des gisements de MR, les caractéristiques territoriales par rapport à ces gisements et les moyens déployés pour la collecte et le transport des MR. Les principales conclusions de ce volet sont (i) une structure hiérarchique de collecte et de transport de MR est toujours bénéfique énergétiquement ; (ii) les méthodes de transport utilisées dans les différents niveaux hiérarchiques devraient tenir compte de l'aspect territorial.

Le deuxième volet porte sur le déploiement territorial de la collecte et le transport des MR pour leur valorisation et se concentre sur l'intégration d'une dimension territoriale de la collecte et

de transport. Celle-ci est évaluée à l'aide d'un modèle développé pour le découpage du territoire selon une structure de type grille, qui permet une évaluation des pertes énergétiques de collecte et de transport. L'organisation du territoire, le type de technologie utilisée pour la valorisation et les méthodes de collecte et de transport permettent d'identifier les zones où la valorisation des MR est favorable. Les conclusions principales de ce deuxième volet sont (i) un compromis devrait être trouvé entre les dimensions structurelles et technologiques des procédés de valorisation des MR ; (ii) le taux de récupération de MR dans le territoire influence aussi le bilan énergétique de la chaîne globale de valorisation.

Le troisième volet concerne la création d'un outil d'aide à la décision pour la localisation des centres de valorisation des MR, basé sur le bilan énergétique de la chaîne globale de valorisation. Différents niveaux de collecte et de transport sont inclus, la collecte et le transport de niveau 1 allant vers un centre de transfert et le transport de niveau 2 vers le centre de valorisation. Les conclusions principales de ce dernier volet sont (i) l'outil développé basé sur le bilan énergétique permet d'étudier la localisation des centres de valorisation pour améliorer la performance énergétique ; (ii) un compromis entre la densité des gisements des MR, la technologie utilisée et la distance au centre de valorisation est nécessaire pour analyser les bénéfices du bilan énergétique de la chaîne globale de valorisation.

Le fait de mettre la dimension territoriale au cœur de l'analyse permet de mettre l'accent sur les gisements de MR et marquer l'importance d'une structure de collecte et de transport des MR au-delà des aspects technologiques de la valorisation. Les résultats de ce travail montrent qu'il existe des contraintes sociales et territoriales, selon lesquelles la localisation des centres de valorisation ne suit pas nécessairement la performance énergétique optimale. L'acceptabilité sociale concernant la gestion des MR est liée aux taux de récupération des filières à valoriser dans le territoire. De plus, ce travail pourrait être amélioré par de nouvelles approches pour augmenter les performances des chaînes de valorisation des MR.

ANNEXE I

COÛTS DE TRANSPORT DES ORDURES MÉNAGÈRES

Tableau A I-1 Données de coûts de transport des ordures ménagères (Bureau d’audiences publiques sur l’environnement, 2022)

Région administrative	Population (habitants)	Quantité d’ordures ménagères (tonnes)	Coût cueillette (collecte + transport (\$))	Coût total (\$)	% coût cueillette/ coût total	Coût cueillette/ tonne	Coût cueillette/ habitant (\$)	Coût total/ habitant (\$)
Bas-Saint-Laurent	197 726	47 598	6 438 980	23 019 459	28	135	484	116
Saguenay–Lac-Saint-Jean	277 897	73 314	10 695 321	25 976 274	41	146	354	93
Capitale-Nationale	751 366	168 885	27 208 314	69 954 819	39	161	414	93
Mauricie	271 016	92 867	7 745 710	18 731 689	41	83	202	69
Estrie	329 747	75 142	8 298 282	22 322 140	37	110	297	68

Gaspésie-Îles-de-la-Madelaine	Nord-du-Québec	Côte-Nord	Abitibi-Témiscamingue	Outaouais	Montréal	Région administrative
90 634	29 607	90 277	147 679	395 659	2 050 053	Population (habitants)
24 537	7 586	26 713	39 531	83 538	453 339	Quantité d'ordures ménagères (tonnes)
6 883 112	807 949	4 213 213	6 732 809	17 211 420	63 763 991	Coût cueillette (collecte + transport (\$))
15 284 294	2 568 278	11 737 538	14 440 634	25 196 017	102 820 375	Coût total (\$)
45	31	36	47	68	62	% coût cueillette/ coût total
281	107	158	170	206	141	Coût cueillette/
623	339	439	365	302	227	Coût cueillette/ habitant (\$)
169	87	130	98	64	50	Coût total/ habitant (\$)

Centre-du-Québec	Montréal	Laurentides	Lanaudière	Laval	Chaudière-Appalaches	Région administrative
249 216	1 579 316	620 955	513 550	439 754	428 437	Population (habitants)
61 428	385 780	165 613	142 019	117 721	107 601	Quantité d'ordures ménagères (tonnes)
10 237 176	46 142 177	2 012 199	16 585 340	7 471 332	16 234 996	Coût cueillette (collecte + transport (\$))
26 097 573	84 302 814	33 023 935	24 384 538	18 700 791	42 728 022	Coût total (\$)
39	55	6	68	40	38	% coût cueillette/ coût total
167	120	12	117	63	151	Coût cueillette/ tonne
425	219	199	172	159	397	Coût cueillette/ habitant (\$)
105	53	53	47	43	100	Coût total/ habitant (\$)

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ahrens, T., Drescher-Hartung, S., Anne, O., 2017. Sustainability of future bioenergy production. *Waste Management* 67, 1–2. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.046>
- Anderluh, A., Hemmelmayr, V.C., Nolz, P.C., 2017. Synchronizing vans and cargo bikes in a city distribution network. *Cent Eur J Oper Res* 25, 345–376. <https://doi.org/10.1007/s10100-016-0441-z>
- Archives Montréal, 2012. L’histoire de l’enlèvement des déchets à Montréal | Archives de Montréal [WWW Document]. URL <https://archivesdemontreal.com/2012/03/19/lhistoire-de-lenlevement-des-dechets-a-montreal/> (accessed 4.5.23).
- Ardolino, F., Parrillo, F., Arena, U., 2018. Biowaste-to-biomethane or biowaste-to-energy? An LCA study on anaerobic digestion of organic waste. *Journal of Cleaner Production* 174, 462–476. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.320>
- Awedem Wobiwo, F., Alleluya, V.K., Emaga, T.H., Boda, M., Fokou, E., Gillet, S., Deleu, M., Gerin, P.A., 2017. Recovery of fibers and biomethane from banana peduncles biomass through anaerobic digestion. *Energy for Sustainable Development* 37, 60–65. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.01.005>
- Awedem Wobiwo, F., Ercoli Balbuena, J.-L., Nicolay, T., Larondelle, Y., Gerin, P.A., 2018. Valorization of spent coffee ground with wheat or miscanthus straw: Yield improvement by the combined conversion to mushrooms and biomethane. *Energy for Sustainable Development* 45, 171–179. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.06.012>
- Ayodele, T.R., Alao, M.A., Ogunjuyigbe, A.S.O., Munda, J.L., 2019. Electricity generation prospective of hydrogen derived from biogas using food waste in south-western Nigeria. *Biomass and Bioenergy* 127, 105291. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105291>
- Azri, S., Ujang, U., Abdullah, N.S., 2023. Within cluster pattern identification: A new approach for optimizing recycle point distribution to support policy implementation on waste management in Malaysia. *Waste Manag Res* 41, 687–700. <https://doi.org/10.1177/0734242X221123489>
- Baldé, H., Wagner-Riddle, C., MacDonald, D., VanderZaag, A., 2022. Fugitive methane emissions from two agricultural biogas plants. *Waste Management* 151, 123–130. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.07.033>
- Barles, S., 2014. History of Waste Management and the Social and Cultural Representations of Waste, in: Agnoletti, M., Neri Serneri, S. (Eds.), *The Basic Environmental History*,

- Environmental History. Springer International Publishing, Cham, pp. 199–226. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09180-8_7
- Bavaghar Zaeimi, M., Abbas Rassafi, A., 2021. Designing an integrated municipal solid waste management system using a fuzzy chance-constrained programming model considering economic and environmental aspects under uncertainty. *Waste Management* 125, 268–279. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.047>
- Béguin, M., 2013. L’histoire des ordures : de la préhistoire à la fin du dix-neuvième siècle. *vertigo* 13.
- Bejan, A., 1997. Theory of organization in nature: pulsating physiological processes. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 40, 2097–2104. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(96\)00291-8](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(96)00291-8)
- Bejan, A., Badescu, V., De Vos, A., 2000. Constructal theory of economics structure generation in space and time. *Energy Conversion and Management* 41, 1429–1451. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00038-8](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00038-8)
- Bejan, A., Lorente, S., 2009. Natural Design with Constructal Theory. *Mechanical Engineering* 131, 44–48. <https://doi.org/10.1115/1.2001-Sep-4>
- Béland, J.-F., Zamboni, I., 2023. Réduire les émissions de GES au Québec: un plan et des outils concrets.
- Benites-Lazaro, L.L., Giatti, L.L., Sousa Junior, W.C., Giarolla, A., 2020. Land-water-food nexus of biofuels: Discourse and policy debates in Brazil. *Environmental Development* 33, 100491. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2019.100491>
- Blazquez, C., Paredes-Belmar, G., 2020. Network design of a household waste collection system: A case study of the commune of Renca in Santiago, Chile. *Waste Management* 116, 179–189. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.027>
- Bouchard-Bastien, I., Girard, K., Audet, M., 2021. Vivre à proximité d’un lieu d’élimination des résidus ultimes : enjeux d’aménagement du territoire et acceptabilité sociale.
- Bourg, M.-C., 2018. Projet pilote de la collecte sélective dans un contexte de collecte intelligente avec tarification incitative - Ville de Beaconsfield. Ville de Beaconsfield.
- Bureau d’audiences publiques sur l’environnement, 2022. L’état des lieux et la gestion des résidus ultimes - Le BAPE publie son rapport.
- Bureau d’audiences publiques sur l’environnement, 1997. Déchets d’hier, ressources de demain [WWW Document]. URL <http://www.bape.gouv.qc.ca/fr/dossiers/dechets-hier-ressources-demain/> (accessed 3.12.23).

- Calisto Friant, M., Vermeulen, W.J.V., Salomone, R., 2020. A typology of circular economy discourses: Navigating the diverse visions of a contested paradigm. *Resources, Conservation and Recycling* 161, 104917. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104917>
- Cantin, G., 2023. Tomber en amour avec la problématique.
- Centre de transfert technologique en écologie industrielle, 2013. Création d'une symbiose industrielle.
- Chan Gutiérrez, E., Wall, D.M., O'Shea, R., Novelo, R.M., Gómez, M.M., Murphy, J.D., 2018. An economic and carbon analysis of biomethane production from food waste to be used as a transport fuel in Mexico. *Journal of Cleaner Production* 196, 852–862. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.051>
- Charvolin, F., 2001. 1970 : L'année clef pour la définition de l'environnement en France. *La revue pour l'histoire du CNRS*. <https://doi.org/10.4000/histoire-cnrs.3022>
- Chen, L., 2012. Progress in study on constructal theory and its applications. *Sci. China Technol. Sci.* 55, 802–820. <https://doi.org/10.1007/s11431-011-4701-9>
- Chen, X., Memon, H.A., Wang, Y., Marriam, I., Tebyetekerwa, M., 2021. Circular Economy and Sustainability of the Clothing and Textile Industry. *Mater Circ Econ* 3, 12. <https://doi.org/10.1007/s42824-021-00026-2>
- Cheng, H., Madanat, S., Horvath, A., 2016. Planning hierarchical urban transit systems for reductions in greenhouse gas emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 49, 44–58. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.08.033>
- Chester, M.V., Horvath, A., 2009. Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains. *Environ. Res. Lett.* 4, 024008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/2/024008>
- Chitaka, T.Y., Schenck, C., 2023. Developing country imperatives in the circular bioeconomy: A review of the South African case. *Environmental Development* 45, 100812. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2023.100812>
- D'Adamo, I., Sassanelli, C., 2022. A mini-review of biomethane valorization: Managerial and policy implications for a circular resource. *Waste Manag Res* 40, 1745–1756. <https://doi.org/10.1177/0734242X221102249>
- Davis, M.L., Cornwell, D.A., 2008. *Introduction to environmental engineering*. McGraw-Hill.
- Delchet, K., 2020. 1.4 Obstacles to the Circular Transition to Mode 2 - Knovel.

- Delorme, A., Karbowski, D., Sharer, P., 2010. Evaluation of fuel consumption potential of medium and heavy duty vehicles through modeling and simulation. (No. ANL/ES/RP-66884). Argonne National Lab. (ANL), Argonne, IL (United States). <https://doi.org/10.2172/981650>
- Dewulf, J., Van Langenhove, H., 2003. Exergetic material input per unit of service (EMIPS) for the assessment of resource productivity of transport commodities. *Resources, Conservation and Recycling* 38, 161–174. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00152-0](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00152-0)
- Dey, A., Thomson, R.C., 2023. The biomethane generation potential of wastes and wastewaters from the sericulture, fisheries, and agro-industrial sectors in India. *Energy for Sustainable Development* 75, 40–59. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.05.001>
- Di Maria, F., Micale, C., 2013. Impact of source segregation intensity of solid waste on fuel consumption and collection costs. *Waste Management* 33, 2170–2176. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.06.023>
- Doña-Grimaldi, V.M., Palma, A., Ruiz-Montoya, M., Morales, E., Díaz, M.J., 2019. Energetic valorization of MSW compost valorization by selecting the maturity conditions. *Journal of Environmental Management* 238, 153–158. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.125>
- Dongqing, J., Xingmei, L., Zhong, S., 2022. Robust optimization model of waste transfer station location considering existing facility adjustment. *Journal of Cleaner Production*.
- dos Muchangos, L.S., Tokai, A., Hanashima, A., 2017. Application of material flow analysis to municipal solid waste in Maputo City, Mozambique. *Waste Manag Res* 35, 253–266. <https://doi.org/10.1177/0734242X16678067>
- Dubois, M., 2023. Découvrir le potentiel de l'IA pour améliorer la gestion des matières résiduelles.
- Farré, J.A., Mateu, C., Teixidó, M., Cabeza, L.F., 2023. Pneumatic Urban Waste Collection Systems: A Review. *Applied Sciences* 13, 877. <https://doi.org/10.3390/app13020877>
- Ferronato, N., Ragazzi, M., Gorritty Portillo, M.A., Guisbert Lizarazu, E.G., Viotti, P., Torretta, V., 2019. How to improve recycling rate in developing big cities: An integrated approach for assessing municipal solid waste collection and treatment scenarios. *Environmental Development* 29, 94–110. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2019.01.002>
- Fondation Ellen MacArthur, 2021a. Artificial intelligence for recycling: AMP Robotics [WWW Document]. [ellenmacarthurfoundation.org](https://www.ellenmacarthurfoundation.org). URL <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-examples/artificial-intelligence-for-recycling-amp-robotics> (accessed 2.10.24).

- Fondation Ellen MacArthur, 2021b. Collection, refurbishment and resale of mobile phone handsets [WWW Document]. [ellenmacarthurfoundation.org. URL https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-examples/collection-refurbishment-and-resale-of-mobile-phone-handsets](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-examples/collection-refurbishment-and-resale-of-mobile-phone-handsets) (accessed 2.10.24).
- Fondation Ellen MacArthur, 2021c. Making new products from urban organic waste streams: De Clique [WWW Document]. [ellenmacarthurfoundation.org. URL https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-examples/de-clique](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-examples/de-clique) (accessed 2.10.24).
- Fondation Ellen MacArthur, 2021d. A dyeing technology that eliminates wastewater release: DyeCoo [WWW Document]. [ellenmacarthurfoundation.org. URL https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-examples/a-dyeing-technology-that-eliminates-wastewater-release-dyecoo](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-examples/a-dyeing-technology-that-eliminates-wastewater-release-dyecoo) (accessed 2.10.24).
- Fondation Ellen MacArthur, 2021e. Algae to sequester carbon: Brilliant Planet [WWW Document]. [ellenmacarthurfoundation.org. URL https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-examples/algae-to-sequester-carbon-brilliant-planet](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-examples/algae-to-sequester-carbon-brilliant-planet) (accessed 2.10.24).
- Fondation Ellen MacArthur, 2021f. Working with nature to produce yerba mate: Guayakí [WWW Document]. [ellenmacarthurfoundation.org. URL https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-examples/working-with-nature-to-produce-yerba-mate-guayaki](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-examples/working-with-nature-to-produce-yerba-mate-guayaki) (accessed 2.10.24).
- Fontaine, C.I., 2021. Diagnostic des centres de tri au Québec.
- Franco-García, M.-L., Carpio-Aguilar, J.C., Bressers, H., 2019. Towards Zero Waste, Circular Economy Boost: Waste to Resources, in: Franco-García, M.-L., Carpio-Aguilar, J.C., Bressers, H. (Eds.), *Towards Zero Waste: Circular Economy Boost, Waste to Resources*. Springer International Publishing, Cham, pp. 1–8. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92931-6_1
- Franzese, O., Davidson, D., 2011. Effect of weight and roadway grade on the fuel economy of class-8 freight trucks (No. ORNL/TM-2011/471). Oak Ridge National Laboratory.
- Ghodoossi, L., Eğrican, N., 2003. Flow area structure generation in point to area or area to point flows. *Energy Conversion and Management* 44, 2609–2623. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00020-7](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00020-7)
- Ghosh, A., Ng, K.T.W., Karimi, N., 2023. An evaluation of the temporal and spatial evolution of waste facilities using a simplified spatial distance analytical framework. *Environmental Development* 45, 100820. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2023.100820>

- Gouvernement du Canada, 2023. Lois codifiées, Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999) [WWW Document]. URL <https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/lois/C-15.31/page-1.html#h-61959> (accessed 10.5.23).
- Gouvernement du Québec, 2024. Navigateur géographique [WWW Document]. MERN. URL <https://mern.gouv.qc.ca/ministere/cartes-information-geographique/navigateur-geographique/> (accessed 4.8.24).
- Gouvernement du Québec, 2022. Adresses Québec [WWW Document]. URL <https://www.adressesquebec.gouv.qc.ca/> (accessed 7.19.22).
- Gouvernement du Québec, 2021. Région administrative 16: Montérégie.
- Gruber, J., Kihm, A., Lenz, B., 2014. A new vehicle for urban freight? An ex-ante evaluation of electric cargo bikes in courier services. *Research in Transportation Business & Management, Managing Freight in Urban Areas* 11, 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2014.03.004>
- Hoornweg, D., Bhada-Tata, P., 2012. *What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management*. World Bank, Washington, DC.
- Institut National d'économie circulaire, 2020. Réseaux majeurs d'économie circulaire en Europe.
- International energy agency, 2020. Outlook for biogas and biomethane Prospects for organic growth. International energy agency.
- Junius, K., Moltedo, M., Cherelle, P., Rodriguez-Guerrero, C., Vanderborght, B., Lefeber, D., 2017. Biarticular elements as a contributor to energy efficiency: biomechanical review and application in bio-inspired robotics. *Bioinspir. Biomim.* 12, 061001. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/aa806e>
- Kong, D., Zhang, K., Liang, J., Gao, W., Du, L., 2018. Methanogenic community during the anaerobic digestion of different substrates and organic loading rates. *Microbiologyopen* 8. <https://doi.org/10.1002/mbo3.709>
- Koonaphapdeelert, S., Moran, J., Aggarangsi, P., Bunkham, A., 2018. Low pressure biomethane gas adsorption by activated carbon. *Energy for Sustainable Development* 43, 196–202. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.01.010>
- Kuddusi, L., Eğrican, N., 2008. A critical review of constructal theory. *Energy Conversion and Management* 49, 1283–1294. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.05.023>
- Kůdela, J., Šomplák, R., Nevrlý, V., Lipovský, T., Smejkalová, V., Dobrovský, L., 2019. Multi-objective strategic waste transfer station planning. *Journal of Cleaner Production* 230, 1294–1304. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.167>

- Kumar, A., Samadder, S.R., 2020. Performance evaluation of anaerobic digestion technology for energy recovery from organic fraction of municipal solid waste: A review. *Energy* 197, 117253. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117253>
- Kuwahara, K., Honda, T., Nakagawa, T., Yamamoto, S., Akter, S., Hayashi, T., Mizoue, T., 2016. Leisure-time exercise, physical activity during work and commuting, and risk of metabolic syndrome. *Endocrine* 53, 710–721. <https://doi.org/10.1007/s12020-016-0911-z>
- Kvist, T., Aryal, N., 2019. Methane loss from commercially operating biogas upgrading plants. *Waste Management* 87, 295–300. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.023>
- La Rosa, A.D., Ramakrishna, S., 2021. Industrial Symbiosis for Circular Economy: A Possible Scenario in Norway, in: *An Introduction to Circular Economy*. Elsevier, Singapore.
- Larsen, A.W., Vrgoc, M., Christensen, T.H., Lieberknecht, P., 2009a. Diesel consumption in waste collection and transport and its environmental significance. *Waste Manag Res* 27, 652–659. <https://doi.org/10.1177/0734242X08097636>
- Larsen, A.W., Vrgoc, M., Christensen, T.H., Lieberknecht, P., 2009b. Diesel consumption in waste collection and transport and its environmental significance. *Waste Manag Res* 27, 652–659. <https://doi.org/10.1177/0734242X08097636>
- Legisfrance, 2023. Directive Européenne n°75-442 du 15 juillet 1975 NO 75442 RELATIVE AUX DECHETS [WWW Document]. URL <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000694590> (accessed 10.5.23).
- Leong, H.Y., Chang, C.-K., Khoo, K.S., Chew, K.W., Chia, S.R., Lim, J.W., Chang, J.-S., Show, P.L., 2021. Waste biorefinery towards a sustainable circular bioeconomy: a solution to global issues. *Biotechnol Biofuels* 14, 87. <https://doi.org/10.1186/s13068-021-01939-5>
- Letelier, C., Blazquez, C., Paredes-Belmar, G., 2022. Solving the bin location–allocation problem for household and recycle waste generated in the commune of Renca in Santiago, Chile. *Waste Management & Research* 40, 121–243. <https://doi.org/10.1177/0734242X20986610>
- Li, W., Yuan, Z., Chen, X., Wang, H., Wang, L., Lou, Z., 2021. Green refuse derived fuel preparation and combustion performance from the solid residues to build the zero-waste city. *Energy* 225, 120252. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120252>
- Liu, Y., Huang, L., Kaloudis, A., Støre-Valen, M., 2017. Does urbanization lead to less energy use on road transport? Evidence from municipalities in Norway. *Transportation*

Research Part D: Transport and Environment 57, 363–377.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.09.021>

Louati, A., Son, L.H., Chabchoub, H., 2019. Smart routing for municipal solid waste collection: a heuristic approach. *J Ambient Intell Human Comput* 10, 1865–1884.
<https://doi.org/10.1007/s12652-018-0778-3>

Lu, J.-W., Chang, N.-B., Liao, L., Liao, M.-Y., 2017. Smart and Green Urban Solid Waste Collection Systems: Advances, Challenges, and Perspectives. *IEEE Systems Journal* 11, 2804–2817. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2015.2469544>

Lu, X., Pu, X., Han, X., 2020. Sustainable smart waste classification and collection system: A bi-objective modeling and optimization approach. *Journal of Cleaner Production* 276, 124183. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124183>

Maimoun, M.A., Reinhart, D.R., Gammoh, F.T., McCauley Bush, P., 2013. Emissions from US waste collection vehicles. *Waste Management* 33, 1079–1089.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.12.021>

Melo, S., Baptista, P., 2017. Evaluating the impacts of using cargo cycles on urban logistics: integrating traffic, environmental and operational boundaries. *Eur. Transp. Res. Rev.* 9, 30. <https://doi.org/10.1007/s12544-017-0246-8>

Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs, 2023. La Loi sur la qualité de l'environnement : faire avancer le Québec de façon responsable au bénéfice de tous [WWW Document]. URL <https://www.environnement.gouv.qc.ca/lqe/autorisations/index.htm> (accessed 10.5.23).

Ministère de l'environnement et la lutte contre les changements climatiques, 2022. Programme de traitement des matières organiques par biométhanisation et compostage - Liste des projets [WWW Document]. URL <https://www.environnement.gouv.qc.ca/programmes/biomethanisation/liste-projets.htm#capitale> (accessed 8.16.22).

Ministère de l'Environnement et la lutte contre les changements climatiques, 2020. Analyse d'impact réglementaire du Plan d'action 2019 2024 de la Politique québécoise de gestion des matières résiduelles. Ministère de l'Environnement et la lutte contre les changements climatiques.

Ministère des transports du Québec, 2022. Réseau routier - RTSS - Données Québec [WWW Document]. URL <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/reseau-routier-rtss> (accessed 7.15.22).

- Moreau, L., 2020. Des noces de cristal pour Éco Entreprises Québec. Éco Entreprises Québec. URL <https://www.eeq.ca/des-noces-de-cristal-pour-eco-entreprises-quebec/> (accessed 11.5.23).
- National Research Council, 2010. Assess Fuel Economy Technologies for Medium- and Heavy-Duty Vehicles Staff.
- Nguyen, T.T.T., Wilson, B.G., 2010. Fuel consumption estimation for kerbside municipal solid waste (MSW) collection activities. *Waste Manag Res* 28, 289–297. <https://doi.org/10.1177/0734242X09337656>
- Ölçer, A., Ballini, F., 2015. The development of a decision making framework for evaluating the trade-off solutions of cleaner seaborne transportation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 37, 150–170. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.04.023>
- Organisation de coopération et de développement économiques, G., 2021. Towards a more resource-efficient and circular economy.
- Pamukoff, D.N., Lewek, M.D., Blackburn, J.T., 2016. Greater vertical loading rate in obese compared to normal weight young adults. *Clinical Biomechanics* 33, 61–65. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2016.02.007>
- Pantaleo, A., Gennaro, B.D., Shah, N., 2013. Assessment of optimal size of anaerobic co-digestion plants: An application to cattle farms in the province of Bari (Italy). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20, 57–70. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.068>
- Passalacqua, E., Collina, E., Fullana, A., Mezzanotte, V., 2024. Mini-review: Nanoparticles for enhanced biogas upgrading. *Waste Manag Res* 0734242X241231397. <https://doi.org/10.1177/0734242X241231397>
- Pérez, J., Lumbreras, J., Rodríguez, E., Vedrenne, M., 2017. A methodology for estimating the carbon footprint of waste collection vehicles under different scenarios: Application to Madrid. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 52, 156–171. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.007>
- Pinto, J.T. de M., Mistage, O., Bilotta, P., Helmers, E., 2018. Road-rail intermodal freight transport as a strategy for climate change mitigation. *Environmental Development* 25, 100–110. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2017.07.005>
- Pires, A., Martinho, G., Rodrigues, S., Gomes, M.I., 2020. Collection: the strongest link for a sustainable solid waste management. *Waste Manag Res* 38, 107–107. <https://doi.org/10.1177/0734242X19893747>

- Plan métropolitain de gestion des matières résiduelles | PMGMR, 2019. . Communauté métropolitaine de Montréal - CMM. URL <https://cmm.qc.ca/planification/plan-metropolitain-de-gestion-des-matieres-residuelles-pmgmr/> (accessed 2.13.22).
- Québec circulaire, 2023a. Stratégies de circularité [WWW Document]. [quebeccirculaire.org. URL https://www.quebeccirculaire.org/static/strategies-de-circularite.html](https://www.quebeccirculaire.org/static/strategies-de-circularite.html) (accessed 11.13.23).
- Québec circulaire, 2023b. Concept et définition [WWW Document]. [quebeccirculaire.org. URL https://www.quebeccirculaire.org/static/h/concept-et-definition.html](https://www.quebeccirculaire.org/static/h/concept-et-definition.html) (accessed 11.14.23).
- Québec circulaire, 2023c. L’emballage réutilisable PickPack: Recevez, Repliez et Réutilisez! [WWW Document]. [quebeccirculaire.org. URL https://www.quebeccirculaire.org/initiative/h/l-emballage-reutilisable-pickpack-recevez-repliez-et-reutilisez.html](https://www.quebeccirculaire.org/initiative/h/l-emballage-reutilisable-pickpack-recevez-repliez-et-reutilisez.html) (accessed 11.15.23).
- Québec circulaire, 2023d. Serveurs informatiques écoresponsables [WWW Document]. [quebeccirculaire.org. URL https://www.quebeccirculaire.org/initiative/h/serveurs-informatiques-ecoresponsables.html](https://www.quebeccirculaire.org/initiative/h/serveurs-informatiques-ecoresponsables.html) (accessed 11.15.23).
- Québec circulaire, 2023e. Symbiose agroalimentaire Montérégie [WWW Document]. [quebeccirculaire.org. URL https://www.quebeccirculaire.org/initiative/h/symbiose-agroalimentaire-monteregie.html](https://www.quebeccirculaire.org/initiative/h/symbiose-agroalimentaire-monteregie.html) (accessed 11.15.23).
- Québec, I. de la S. du, n.d. Recensement de la population 2011, municipalités, MRC et TE de Montréal (06) et Laval (13) et ensemble du Québec [WWW Document]. URL https://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/recensement/2011/recens2011_06/index.html (accessed 8.16.20).
- Quintili, A., Castellani, B., 2020. The Energy and Carbon Footprint of an Urban Waste Collection Fleet: A Case Study in Central Italy. *Recycling* 5, 25–0. <https://doi.org/10.3390/recycling5040025>
- Rafiee, A., Khalilpour, K.R., Prest, J., Skryabin, I., 2021. Biogas as an energy vector. *Biomass and Bioenergy* 144, 105935. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105935>
- Ramos, M.D.N., Milessi, T.S., Candido, R.G., Mendes, A.A., Aguiar, A., 2022. Enzymatic catalysis as a tool in biofuels production in Brazil: Current status and perspectives. *Energy for Sustainable Development* 68, 103–119. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.03.007>
- Rao, C., Goh, M., Zhao, Y., Zheng, J., 2015. Location selection of city logistics centers under sustainability. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 36, 29–44. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.02.008>
- RECYC-QUEBEC, 2023. bilan-gmr-2021-collecte-selective.

- RECYC-QUÉBEC, 2023a. La valorisation énergétique.
- RECYC-QUÉBEC, 2023b. RECYC-QUÉBEC - Les 3RV sous la loupe [WWW Document]. RECYC-QUÉBEC. URL <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/citoyens/mieux-consommer/zone-jeunesse/3rv> (accessed 3.12.23).
- RECYC-QUÉBEC, 2023c. Notre mission, vision, mandat et nos valeurs. RECYC-QUÉBEC. URL <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/a-propos/qui-sommes-nous/mission-vision-mandat-valeurs/> (accessed 11.12.23).
- RECYC-QUEBEC, 2022. RECYC-QUÉBEC - Avantages de la responsabilité élargie des producteurs [WWW Document]. RECYC-QUÉBEC. URL <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/municipalites/mieux-gerer/avantages-responsabilite-elargie-producteurs/> (accessed 2.6.22).
- RECYC-QUEBEC, 2018. Bilan 2018 de la gestion des matières résiduelles au Québec [WWW Document]. URL <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/bilan-gmr-2018-complet.pdf> (accessed 8.19.22).
- Ressources naturelles Canada, 2014. Learn the facts: Emissions from your vehicle.
- Richards, S.J., Al Zaili, J., 2020. Contribution of encouraging the future use of biomethane to resolving sustainability and energy security challenges: The case of the UK. *Energy for Sustainable Development* 55, 48–55. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.12.003>
- Riggs, W., 2016. Cargo bikes as a growth area for bicycle vs. auto trips: Exploring the potential for mode substitution behavior. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 43, 48–55. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.09.017>
- Rodrigues, S., Martinho, G., Pires, A., 2016. Waste collection systems. Part B: Benchmarking indicators. Benchmarking of the Great Lisbon Area, Portugal. *Journal of Cleaner Production* 139, 230–241. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.146>
- Rogoff, M.J., Ross, D.E., 2017. Solid waste collection technology trends in North America. *Waste Manag Res* 35, 217–219. <https://doi.org/10.1177/0734242X17694531>
- Rose, L., Hussain, M., Ahmed, S., Malek, K., Costanzo, R., Kjeang, E., 2013. A comparative life cycle assessment of diesel and compressed natural gas powered refuse collection vehicles in a Canadian city. *Energy Policy, Special Section: Transition Pathways to a Low Carbon Economy* 52, 453–461. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.09.064>
- Rotunno, P., Lanzini, A., Leone, P., 2017. Energy and economic analysis of a water scrubbing based biogas upgrading process for biomethane injection into the gas grid or use as

- transportation fuel. Renewable Energy 102, 417–432.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.062>
- Rylander, H., Lagerkvist, A., 2024. From dumping to circular economy: There is no success like failure. Waste Manag Res 0734242X231221084.
<https://doi.org/10.1177/0734242X231221084>
- Sailer, G., Eichermüller, J., Poetsch, J., Paczkowski, S., Pelz, S., Oechsner, H., Müller, J., 2021. Characterization of the separately collected organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) from rural and urban districts for a one-year period in Germany. Waste Management 131, 471–482. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.07.004>
- Sanchuan, O., Hongguang, Z., Junjie, C., Minqi, Z., 2019. Optimization and GIS-based combined approach for the determination of sites and size of biogas plants for a whole region. E3S Web of Conferences 118, 03020.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911803020>
- Sandhu, G.S., Frey, H.C., Bartelt-Hunt, S., Jones, E., 2015. In-use activity, fuel use, and emissions of heavy-duty diesel roll-off refuse trucks. Journal of the Air & Waste Management Association 65, 306–323.
<https://doi.org/10.1080/10962247.2014.990587>
- Saravanan, A., Kumar, P.S., Nhung, T.C., Ramesh, B., Srinivasan, S., Rangasamy, G., 2022. A review on biological methodologies in municipal solid waste management and landfilling: Resource and energy recovery. Chemosphere 309, 136630.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136630>
- Sarker, B.R., Wu, B., Paudel, K.P., 2019. Modeling and optimization of a supply chain of renewable biomass and biogas: Processing plant location. Applied Energy 239, 343–355. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.216>
- Schliwa, G., Armitage, R., Aziz, S., Evans, J., Rhoades, J., 2015. Sustainable city logistics — Making cargo cycles viable for urban freight transport. Research in Transportation Business & Management, Managing the Business of Cycling 15, 50–57.
<https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2015.02.001>
- Seadon, J.K., 2010. Sustainable waste management systems. Journal of Cleaner Production 18, 1639–1651. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.07.009>
- Seethapathi, N., Srinivasan, M., 2015. The metabolic cost of changing walking speeds is significant, implies lower optimal speeds for shorter distances, and increases daily energy estimates. Biology Letters 11, 20150486.
<https://doi.org/10.1098/rsbl.2015.0486>
- Service de l'Environnement de la ville de Montreal, 2017. Portrait 2016 des matières résiduelles de l'agglomération de Montréal.

- Sliz-Szkliniarz, B., Vogt, J., 2012. A GIS-based approach for evaluating the potential of biogas production from livestock manure and crops at a regional scale: A case study for the Kujawsko-Pomorskie Voivodeship. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 752–763. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.001>
- Système modernisé de collecte sélective au Québec, 2021. 6.
- Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., Valijanian, E., Kazemi Shariat Panahi, H., Nizami, A.-S., Ghanavati, H., Sulaiman, A., Mirmohamadsadeghi, S., Karimi, K., 2020. A comprehensive review on recent biological innovations to improve biogas production, Part 1: Upstream strategies. *Renewable Energy* 146, 1204–1220. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.037>
- Tanguy, A., Glaus, M., Laforest, V., Villot, J., Hausler, R., 2016. A spatial analysis of hierarchical waste transport structures under growing demand. *Waste Manag Res* 34, 1064–1073. <https://doi.org/10.1177/0734242X16658544>
- Tanguy, A., Villot, J., Glaus, M., Laforest, V., Hausler, R., 2017. Service area size assessment for evaluating the spatial scale of solid waste recovery chains: A territorial perspective. *Waste Management* 64, 386–396. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.027>
- Tatsiopoulou, I.P., Tolis, A.J., 2003. Economic aspects of the cotton-stalk biomass logistics and comparison of supply chain methods. *Biomass and Bioenergy* 24, 199–214. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00115-0](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00115-0)
- Tirkolaee, E.B., Mahdavi, I., Esfahani, M.M.S., Weber, G.-W., 2020. A robust green location-allocation-inventory problem to design an urban waste management system under uncertainty. *Waste Management* 102, 340–350. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.038>
- Tock, L., Schummer, J., 2017. Sustainable waste-to-value biogas plants for developing countries. *Waste Management* 64, 1–2. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.014>
- Trancossi, M., 2016. What price of speed? A critical revision through constructal optimization of transport modes. *Int J Energy Environ Eng* 7, 425–448. <https://doi.org/10.1007/s40095-015-0160-6>
- US EPA, O., 2013. EPA History: Resource Conservation and Recovery Act [WWW Document]. URL <https://www.epa.gov/history/epa-history-resource-conservation-and-recovery-act> (accessed 10.5.23).
- Varcin, L., Claus, A., van den Hoorn, W., Hodges, P., 2015. Manual handling: differences in perceived effort, success rate and kinematics between three different pushing techniques. *Ergonomics* 58, 268–277. <https://doi.org/10.1080/00140139.2014.970586>

- Veiga, M.M., 2013. Analysis of efficiency of waste reverse logistics for recycling. *Waste Manag Res* 31, 26–34. <https://doi.org/10.1177/0734242X13499812>
- Vilardi, G., Bassano, C., Deiana, P., Verdone, N., 2020. Exergy and energy analysis of three biogas upgrading processes. *Energy Conversion and Management* 224, 113323. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113323>
- Ville de Gatineau, 2021. Faits saillants | Rapport annuel 2021 | Ville de Gatineau [WWW Document]. URL https://www.gatineau.ca/docs/publications_cartes_statistiques_donnees_ouvertes/publications/20230101_rapport_annuel_2021/environnement_developpement_durable.html (accessed 4.3.23).
- Ville de Montréal, 2023. Politique sur les événements écoresponsables.
- Vrbová, V., Ciahotný, K., 2017. Upgrading Biogas to Biomethane Using Membrane Separation. *Energy Fuels* 31, 9393–9401. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b00120>
- Vu, H.L., Ng, K.T.W., Fallah, B., Richter, A., Kabir, G., 2020. Interactions of residential waste composition and collection truck compartment design on GIS route optimization. *Waste Management* 102, 613–623. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.028>
- Weber, S., 2023. Circular Economy Strategies for the Textile Industry.
- Wright, M., Brown, R.C., 2007. Establishing the optimal sizes of different kinds of biorefineries. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 1, 191–200. <https://doi.org/10.1002/bbb.25>
- Wu, B., Sarker, B.R., Paudel, K.P., 2015. Sustainable energy from biomass: Biomethane manufacturing plant location and distribution problem. *Applied Energy* 158, 597–608. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.080>
- Yang, F., Feng, L., Zhen, X., 2022. Influence of organic loading rate and temperature fluctuation caused by solar energy heating on food waste anaerobic digestion. *Waste Manag Res* 40, 1440–1449. <https://doi.org/10.1177/0734242X221081674>
- Young, M.S., 2009. Kodak's Ergonomic Design for People at Work. *Ergonomics* 52, 756–757. <https://doi.org/10.1080/00140130902924147>
- Zbib, H., Wøhlk, S., 2019. A comparison of the transport requirements of different curbside waste collection systems in Denmark. *Waste Management* 87, 21–32. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.037>
- Zhou, S., Chen, L., Sun, F., 2007. Optimization of constructal economics for volume-to-point transport. *Applied Energy* 84, 505–511. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2006.09.005>

Zhou, Z., Tang, Y., Chi, Y., Ni, M., Buekens, A., 2018. Waste-to-energy: A review of life cycle assessment and its extension methods. *Waste Manag Res* 36, 3–16. <https://doi.org/10.1177/0734242X17730137>