

Analyse de la performance environnementale d'un réseau
décentralisé des centres de conditionnement de matières
résiduelles : étude de cas à la ville de Montréal

par

Jessy ANGLEHART-NUNES

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 17 JUILLET 2023

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Jessy Anglehart-Nunes, 2023



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

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

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

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

M. Amin Chaabane, membre du jury
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

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

LE 21 JUIN 2023

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier Mathias Glaus, mon directeur de recherche. Son soutien pédagogique tout au long de mon cheminement m'a permis de consolider mes compétences et d'acquérir plusieurs nouvelles connaissances en environnement et en gestion des matières résiduelles. Son accompagnement demeure tout aussi assidu depuis que j'ai entamé ce projet à l'automne 2020 alors que je terminais mon baccalauréat en génie logiciel. Grâce à lui, je ressors grandi de ce projet d'études et me sens prêt à entamer le prochain chapitre de mon parcours professionnel. Ses qualités m'ont motivé à entamer un nouveau projet d'étude sous sa direction. J'ai hâte de pouvoir mettre en pratique tout ce que j'ai consolidé.

Je souhaite ensuite remercier toute l'équipe de la STEPPE que j'ai pu côtoyer depuis mon arrivée à l'hiver 2021. Votre écoute et votre soutien m'ont permis de garder ma motivation tout au long de mon projet d'études. J'ai déjà hâte à une prochaine jasette autour d'un bon café !

Finalement, je souhaite remercier Cloé pour son écoute et son soutien très chaleureux. J'apprécie grandement ton enthousiasme à apprendre toujours plus sur mon projet de recherche. Ton écoute m'a permis de débloquer certains questionnements et me donner une rigueur supplémentaire que je n'aurais jamais envisagée sans ta présence. J'ai hâte de pouvoir répéter l'expérience dans la suite de mon parcours.

Analyse de la performance environnementale d'un réseau décentralisé des centres de conditionnement de matières résiduelles : étude de cas à la ville de Montréal

Jessy ANGLEHART-NUNES

RÉSUMÉ

Les matières résiduelles générées augmentent d'année en année. Les infrastructures centralisées de traitement augmentent le nombre de camions pour satisfaire cette demande croissante, ce qui croit la pression sur le réseau routier et les émissions de gaz à effet de serre. Pour pallier ces limitations, l'approche décentralisée crée un réseau distribué de centres sur le territoire.

Ce projet de recherche étudie l'impact de l'intégration de la décentralisation sur la récupération des matières résiduelles. Plus spécifiquement, la méthodologie modélise la génération de matières résiduelles, la planification d'itinéraires de collecte et de transport et la localisation de centres de conditionnement. Cette approche est appliquée à une étude de cas à Montréal pour une filière de polytéréphtalate d'éthylène (PET; Plastique no. 1). Pour chaque scénario de décentralisation envisagé (nombre de centres déployés), l'étude de cas calcule deux indicateurs de performance : les coûts d'exploitation et d'investissement ainsi que les gaz à effets de serre. Un scénario de référence permet la comparaison des scénarios envisagés.

Les résultats montrent que, pour l'étude de cas, la décentralisation réduit les émissions de gaz à effet de serre de 20,3 % et les frais d'exploitation de 8,04 %. En revanche, l'investissement dans la nouvelle infrastructure demeure le plus grand frein financier. Ce coût peut atteindre jusqu'à 89,7 % des dépenses dans un contexte centralisé. Malgré tout, la décentralisation augmente la flexibilité de la collecte face à une demande en évolution. Le kilométrage par tonne est réduit de 35,3% et le tonnage moyen par itinéraire est réduit de 12,8 %. D'ailleurs, dans l'étude de cas, la collecte et le transport s'est appliqué sur un territoire qui a généré 1,15 kt de matières recyclables, réparti sur 22 326 tronçons.

Plus largement, la méthodologie développée demeure générique et applicable à d'autres contextes territoriaux et d'affaires. Elle peut être utilisée pour envisager d'autres décisions sur la gestion des matières résiduelles comme la mutualisation de l'infrastructure ou la collecte à la demande.

Mots-clés : gestion des matières résiduelles, collecte et transport, centre de traitement, modélisation, approches bio-inspirés, milieu urbain

Environmental Performance Assessment of a Decentralized Network of Waste Conditioning Facilities: Case Study at Montréal

Jessy ANGLEHART-NUNES

ABSTRACT

The generation of municipal solid waste grows each year. Centralized waste treatment infrastructures dispatch more trucks to collect the growing demand, which gives more pressure on the road network and greenhouse gas emissions. To palliate these limitations, the decentralized approach creates a network of distributed waste treatment facilities across a territory.

This research project studies the impact of the integration of decentralization on waste collection. Specifically, the methodology models waste generation, collection routes and localization of waste conditioning centers. This approach is applied to a case study in Montreal for a polyethylene terephthalate (PET; no.1 plastic) chain. For each considered decentralization scenario (number of waste conditioning centers deployed), the case study computes two performance indicators: costs and greenhouse gas emissions. A reference scenario allows the comparison of the considered scenarios.

The results show that, for the case study, decentralization reduces greenhouse gas emissions by 20,3 % and operation costs by 8,04 %. However, the investment costs for the new infrastructure remain the biggest financial obstacle. These costs can represent up to 89,7 % of the expenses in a decentralized context. Nonetheless, decentralization grows the flexibility of waste collection under a changing demand. The mileage per ton has reduced by 35,3 % and the average tonnage by trip has reduced by 12,8 %. Furthermore, in the case study, waste collection has been applied on a territory that generated 1,16 kt of recyclable waste, distributed over 22 326 road sections.

In a larger perspective, the developed methodology remains generic and applicable to other territories or business cases. It can be used to consider other decisions on waste management such as mutualization of infrastructure and on-demand collection.

Keywords : municipal solid waste management, waste transportation, treatment center, modelling, bio-inspired approaches, urban environment

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 ÉTAT DES CONNAISSANCES.....	3
1.1 Caractérisation des matières résiduelles	4
1.1.1 Catégories de matières résiduelles	4
1.1.2 Quantités de matières générées.....	6
1.1.3 Enjeux environnementaux des matières résiduelles	9
1.2 Processus de gestion intégrée des matières résiduelles.....	12
1.2.1 Profils de génération des matières résiduelles dans un contexte territorial	16
1.2.2 Collecte et transport des matières résiduelles : modes et planifications...	17
1.2.3 Centres de traitement de matières résiduelles et configuration du territoire.....	19
1.3 Démarche d'aide à la prise de décision.....	24
1.3.1 Modélisation de la planification d'itinéraires de collecte	24
1.3.2 Indicateurs utilisés dans l'évaluation de la collecte et du transport.....	29
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE.....	33
2.1 Présentation de l'étude de cas	34
2.2 Cartographie des gisements	37
2.3 Modélisation du processus de collecte et de transport.....	41
2.3.1 Construction du multigraphe du réseau routier.....	41
2.3.2 Collecte des matières résiduelles par algorithme mémétique	45
2.3.3 Bancs d'essais pour la validation.....	47
2.4 Évaluation de la performance des scénarios de décentralisation des centres de conditionnement des matières recyclables.....	48
2.4.1 Scénarios de décentralisation.....	48
2.4.2 Emplacement des centres de conditionnements par partitionnement du territoire.....	49
2.4.3 Indicateurs de performances	51
2.5 Détails d'implémentation.....	59
CHAPITRE 3 RÉSULTATS.....	61
3.1 Génération spatiale des matières résiduelles.....	61
3.2 Simulation de la collecte et du transport.....	64
3.2.1 Multigraphe du réseau routier.....	65
3.2.2 Paramètres d'exécution de l'algorithme mémétique sur le sous-territoire	66
3.2.3 Itinéraires de collecte et de transport dans le sous-territoire.....	68
3.3 Performances de la décentralisation.....	71
3.3.1 Emplacement des centres de conditionnement	71

3.3.2	Performances des scénarios de décentralisation	77
3.3.3	Diagnostic sur l'approche décentralisée	83
CHAPITRE 4	DISCUSSION	87
4.1	Opérationnalisation de la démarche.....	87
4.1.1	Intégration au contexte territorial actuel.....	87
4.1.2	Mutualisation de l'infrastructure.....	92
4.1.3	Dimension temporelle associée à la gestion des matières résiduelles	93
4.2	Potentiels de l'algorithme mémétique	94
4.3	Perspectives du modèle.....	95
4.3.1	Application à d'autres contextes territoriaux.....	96
4.3.2	Application à d'autres planifications d'itinéraires.....	97
4.3.3	Collecte à la demande	99
CONCLUSION	101
ANNEXE I	COMPOSANTS DE L'ALGORITHME MÉMÉTIQUE	103
ANNEXE II	MODULARISATION DES COUTS DES CENTRES DE CONDITIONNEMENT	109
ANNEXE III	DONNÉES DE GÉNÉRATION DES MATIÈRES RÉSIDUELLES DE LA VILLE DE MONTRÉAL.....	111
ANNEXE IV	DONNÉES DU MULTIGRAPHE DU RÉSEAU ROUTIER SUR LA VILLE DE MONTRÉAL	117
ANNEXE V	CALIBRATION DE L'ALGORITHME MÉMÉTIQUE.....	119
ANNEXE VI	DONNÉES DES ITINÉRAIRES DES SCÉNARIOS DE DÉCENTRALISATION.....	127
ANNEXE VII	CARTOGRAPHIES DES GRAPPES D'ARRONDISSEMENT.....	133
ANNEXE VIII	LOCALISATION DES CENTRES DE CONDITIONNEMENT SELON LE SCÉNARIO D'ÉTUDE	137
ANNEXE IX	DONNÉES DES PERFORMANCES POUR L'ENSEMBLE DES SCÉNARIOS DE DÉCENTRALISATION	141
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		147

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Catégories de matières résiduelles du secteur municipal sur deux contextes territoriaux6
Tableau 1.2	Enjeux environnementaux et mesures d'atténuation associés à la collecte et au transport des matières résiduelles.....9
Tableau 1.3	Enjeux environnementaux et mesures d'atténuation et de traitement associés à la gestion des matières recyclables10
Tableau 1.4	Impacts environnementaux et mesures d'atténuation associés à la gestion des matières organiques.....11
Tableau 1.5	Impacts environnementaux et mesures d'atténuation et de traitement associés à la gestion des ordures ménagères.....11
Tableau 1.6	Retombées du détournement des matières recyclables et des matières organiques de l'enfouissement12
Tableau 1.7	Processus de gestion des matières résiduelles14
Tableau 1.8	Taux de génération des matières recyclables selon le type de logement au Québec.....17
Tableau 1.9	Définitions de certains modes de collecte.....18
Tableau 1.10	Définitions de quelques statistiques spatiales20
Tableau 1.11	Familles de méthodes de groupement des données22
Tableau 1.12	Quelques modèles de planification d'itinéraires de collecte et caractéristiques associées.....25
Tableau 1.13	Description d'approches métaheuristiques pour la résolution de problèmes NP-Compleet.....27
Tableau 1.14	Indicateurs économiques utilisés pour la gestion de matières résiduelles .30
Tableau 2.1	Utilisation des jeux de données de l'étude de cas par éléments méthodologiques36
Tableau 2.2	Propriétés des unités d'évaluations foncières pour la collecte de données 38

Tableau 2.3	Codes d'utilisation des bien-fonds considérés pour l'étude.....	38
Tableau 2.4	Coefficient saisonnier cs selon le mois dans l'année.....	40
Tableau 2.5	Propriétés des arcs E du multigraphe $\Gamma = V, E$	41
Tableau 2.6	Vitesses moyennes d'un camion selon le type de tronçon	43
Tableau 2.7	Paramètres standards de l'algorithme mémétique	47
Tableau 2.8	Découpage du territoire selon le degré de décentralisation	48
Tableau 2.9	Seuils de capacité de traitement de matières résiduelles selon la catégorie du centre de conditionnement	51
Tableau 2.10	Valeurs des paramètres du facteur d'émission à chaud selon le type de polluant	54
Tableau 2.11	Valeur du facteur d'émission à froid selon le type de polluant	55
Tableau 2.12	Cout d'investissement annualisé selon la catégorie du centre de conditionnement.....	56
Tableau 2.13	Masse molaire des polluants et du carburant considéré pour l'étude	58
Tableau 2.14	Cout modularisé du conditionnement de matières résiduelles selon la catégorie du centre de conditionnement	58
Tableau 3.1	Taux d'inoccupation estimé selon les arrondissements de collecte	62
Tableau 3.2	Comparaison de la population générée par le modèle et de la valeur témoin selon les arrondissements de collecte	63
Tableau 3.3	Comparaison des matières recyclables générés par le modèle et de la valeur de référence selon les arrondissements de collecte.....	64
Tableau 3.4	Statistiques de distribution sur le temps de passage, le temps de collecte et les matières recyclables du multigraphe $\Gamma = (V, E)$ du sous-territoire montréalais.....	65
Tableau 3.5	Paramètres de l'algorithme mémétique pour l'étude de cas	67
Tableau 3.6	Statistiques sur les itinéraires du scénario de référence.....	69
Tableau 3.7	Statistiques sur les distances parcourues par itinéraires du scénario de référence.....	70

Tableau 3.8	Grappes des arrondissements selon le degré de décentralisation.....	73
Tableau 3.9	Émissions des différents polluants et consommation de carburant pour le scénario de référence.....	78
Tableau 3.10	Couts associés au scénario de référence	79
Tableau 3.11	Indicateur des couts associés aux économies de CO ₂ par scénario	80
Tableau 4.1	Pourcentage des centres de conditionnement déployés selon la catégorie du bien-fonds.....	89
Tableau 4.2	Pistes d'intégrations des adaptations réalisées par l'étude.....	91
Tableau 4.3	Étapes de traitements pour les informations manquantes qui facilitent le traitement des données.....	96
Tableau 4.4	Approche de modélisation du multigraphe $\Gamma = (V, E)$ selon le contexte à l'étude	98

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Catégorisations de matières résiduelles au Québec	5
Figure 1.2	Quantités annuelles de matières résiduelles collectées du secteur municipal par personnes selon les catégories et les territoires	7
Figure 1.3	Proportion des matières résiduelles générées selon le territoire	8
Figure 1.4	Dynamique des 4R-VD.....	14
Figure 2.1	Approche méthodologique.....	33
Figure 2.2	Territoire à l'étude	34
Figure 2.3	Définition des limites et des éléments du système de gestion des matières résiduelles étudié	37
Figure 2.4	Sommaire de l'exécution de l'algorithme mémétique	46
Figure 3.1	Graphe de connexion des arrondissements de la Ville de Montréal.....	72
Figure 3.2	Centre moyen pondéré des grappes d'arrondissements.....	75
Figure 3.3	Proportion des différentes catégories de centres de conditionnement selon le scénario étudié	77
Figure 3.4	Part des coûts selon le scénario de décentralisation.....	81
Figure 3.5	Diminution relative des coûts et des émissions de GES selon le scénario par rapport au scénario de référence	82
Figure 3.6	Réduction relative des kilométrages pour collecter une tonne et de la vitesse moyenne du camion	84
Figure 3.7	Acheminement des camions après la dernière rue collectée pour le quatrième scénario (quatre centres déployés dans le sous-territoire)	85

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AMém	Algorithme mémétique
BAPE	Bureau d'audiences publiques sur l'environnement
CARP	Problème de routage d'arc avec capacité (<i>capacitated arc routing problem</i>)
CDT	Centre de tri
CESM	Complexe environnemental de Saint-Michel
CRD	Construction, rénovation et démolition
CLRP	Problème de routage avec capacité basé sur la localisation (<i>Capacitated location routing problem</i>)
CO	Monoxyde d'azote
CVRP	Problème de routage de véhicule avec capacité (<i>capacitated vehicle routing problem</i>)
DD	Degré de décentralisation
DSO	Données spatiales ouvertes
GES	Gaz à effets de serre
GMR	Gestion des matières résiduelles
HC	Hydrocarbonés
ICI	Industries, commerces et institutions
MEET	<i>Methodology for Calculating Transport Emission and Energy Consumption</i>
MR	Matières résiduelles
MO	Matières organiques
MRec	Matières recyclables
OM	Ordures ménagères

OPCQ	Office de la consultation publique de Montréal
PET	Polytéréphtalate d'éthylène
PM	Particules fines (<i>particulate matter</i>)
RDD	Résidus domestiques dangereux
UEF	Unité d'évaluation foncière
VRP	Problème de routage de véhicules (<i>Vehicle routing problem</i>)

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

A	Matrice d'adjacence d'un graphe $G = (V, E)$
B	Ensemble de bâtiments. Un bâtiment b détient les propriétés suivantes :
- $a(b)$	Arrondissement d'un bâtiment
- $\lambda(b)$	Latitude d'un bâtiment
- $n_l(b)$	Nombre de logements d'un bâtiment
- $\varphi(b)$	Longitude d'un bâtiment
- $p(b)$	Population d'un bâtiment
- $t_m(b)$	Temps de marche d'un bâtiment
- $m(b)$	Masse de matière résiduelles hebdomadaire d'un bâtiment
- $t_g(b)$	Taux de génération hebdomadaire de matières résiduelles d'un bâtiment
b_i	Borne inférieure de l'algorithme mémétique
C	Tableau de distribution des logements par ménage, pour un arrondissement donné
D	Matrice de distance issu de l'algorithme de Dijkstra
\mathcal{D}	Matrice de degré d'un graphe $G = (V, E)$
c	Facteur de conversion
$c_d(r)$	Carburant consommée à un tronçon
c_{dd}	Indicateur économique d'un scénario
$c_{i_{dd}}$	Couts d'investissement d'un scénario
$c_{o_{dd}}$	Couts d'opération d'un scénario
c_k	Couts (d'opération, d'investissement et autres)
$c_{p_{\max}}$	Maximum de croisement productifs
$c_{np_{\max}}$	Maximum de croisement non productifs
c_s	Coefficient saisonnier
d_m	Distance de marche

e_{p_k}	Émission d'un polluant
$e_{p_{k,c}}$	Émission à chaud d'un polluant
$e_{p_{k,f}}$	Émission à froid d'un polluant
$\epsilon_{k,c}$	Facteur d'émission à chaud d'un polluant
$\epsilon_{k,f}$	Facteur d'émission à froid d'un polluant
$G = (V, E)$	Graphe
$\Gamma = (V, E)$	Multigraphe représentant le réseau routier pour la collecte de matières résiduelles. En plus de posséder les propriétés du tronçon routier, une arête e détient les propriétés suivantes : <ul style="list-style-type: none"> - $c_c(e)$ Cout de collecte de l'arête - $c_t(e)$ Cout de passage de l'arête - $i_r(e)$ Identifiant du tronçon du réseau routier associé à l'arête - $m_r(e)$ Demande de l'arête
$H = (V, E)$	Graphe auxiliaire associé à une séquence de tâches
I	Ensemble des intersections. Une intersection i détient la propriété suivante : <ul style="list-style-type: none"> - $p(i)$ Coordonnées géographiques de l'intersection
i_{dd}	Indicateur de performance d'un degré de décentralisation
k	Coefficient de rapidité d'atteinte de la vitesse maximale moyenne
L	Matrice Laplacienne d'un graphe $G = (V, E)$
λ	Valeurs propres d'une matrice
$\bar{\lambda}_w$	Latitude du centre moyen pondéré
M_k	Masse molaire d'un polluant
m_{mr}	Masse de matières résiduelles
n_c	Nombre de chromosomes

n_d	Nombre de démarrages d'un véhicule
n_{rd}	Nombre maximal de phases de recherches dans l'algorithme mémétique
n_{rp}	Nombre de chromosomes à remplacer
P	Matrice de prédécesseurs issu de l'algorithme de Dijkstra
p_{rl}	Probabilité d'enclencher la recherche locale
$\bar{\varphi}_w$	Longitude du centre moyen pondéré
Π	Population de chromosomes de l'algorithme mémétique
R	Ensemble des tronçons. Un tronçon r détient les propriétés suivantes :
- $d(r)$	Distance totale du tronçon
- $d_a(r)$	Distance entre les arrêts d'un tronçon
- $b(r)$	Bâtiments d'un tronçon
- $b_d(r)$	Bâtiments du côté droit du tronçon
- $b_g(r)$	Bâtiments du côté gauche du tronçon
- $f_a(r)$	Fréquence d'arrêt des camions dans un tronçon
- $t_v(r)$	Temps de traverses entre les arrêts d'un tronçon
- $p_d(r)$	Coordonnées géographiques du point de départ du tronçon
- $p_f(r)$	Coordonnées géographiques du point d'arrivée du tronçon
- $c(r)$	Sens de circulation du tronçon
- $m(r)$	Demande (masse de matière résiduelle) du tronçon
- $n_a(r)$	Nombre d'arrêts d'un camion dans un tronçon
- $v_t(r)$	Vitesse de traverse du tronçon
ρ	Masse volumique
T	Sous-ensemble des tâches (tronçons qui détiennent une demande et qui doivent être collectées). Elle possède les mêmes propriétés qu'un tronçon et la propriété supplémentaire suivante
- $idx(\tau)$	Position de la tâche dans la séquence
$t_{gmr}(a)$	Taux de génération d'une personne pour un arrondissement donné et une année donnée
s	Chromosome. Un chromosome détient les propriétés suivantes :
- $F(s)$	Évaluation (cout total) d'un chromosome
- $T(s)$	Séquence de tâches d'un chromosome

σ	Arête virtuel représentant le dépôt (centre de conditionnement) dans le multigraphe
$\mathcal{U}_E[a, b]$	Distribution uniforme. Utilisé pour décrire la sélection aléatoire d'un nombre d'un certain ensemble E entre a et b
v_{\max}	Vitesse maximale moyenne
\vec{x}_λ	Vecteur propre associé à une valeur propre
$z(r)$	Chargement d'un camion à un tronçon

INTRODUCTION

Le concept de matières résiduelles (MR) met de l'avant le potentiel économique des déchets (RECYC-QUÉBEC, s.d.-c). En outre, le recyclage crée de nouvelles matières à partir de MR au lieu de la matière première (RECYC-QUÉBEC, s.d.-c). Similairement, la valorisation transforme la MR en une matière dans un autre cycle de production (RECYC-QUÉBEC, s.d.-c). Les deux activités permettent de détourner les MR de l'enfouissement et de réduire la consommation des ressources (RECYC-QUÉBEC, 2020). Ces MR doivent néanmoins être récupérées et conditionnées avant d'appliquer le processus de recyclage ou de valorisation.

Entre 2012 et 2016, les MR générés mondialement ont augmenté de 54,6 % (Hoornweg & Bhada-Tata, 2012; Kaza, Yao, Bhada-Tata, & Van Woerden, 2018) et peuvent doubler tous les dix ans (Ma, Zhang, Feng, Lev, & Li, 2021), ce qui accentue la demande en collecte et transport. De plus, pour une tonne de MR, la collecte et le transport tend à émettre 2,5 t de CO₂ (Baky & Eriksson, 2003; Énergie et Ressources naturelles, 2019; Lou & Nair, 2009) alors que l'enfouissement émet jusqu'à 1,29 t de CO₂ (Lou & Nair, 2009). Sur le plan économique, collecter et transporter une tonne de MR coûte, en moyenne, au Canada, entre 35 et 100 \$ (Richter, Ng, & Karimi, 2021).

Au Québec, les municipalités sont responsables de mettre en place un programme de gestion des MR (GMR) qui vise notamment la collecte et le transport pour les ménages et les petits commerces, industries ou institutions (ICI) (Gouvernement du Québec, 2021). Les municipalités tendent également à centraliser les infrastructures de tri et de conditionnement. Notamment, à Montréal, c'est au Complexe environnemental Saint-Michel (CESM) que sont triées toutes les matières recyclables (MRec) générées par les ménages montréalais (Ville de Montréal, 2020). Face à l'augmentation des MR, cette infrastructure peut généralement répondre par l'envoi de plus de camions, ce qui augmente la pression sur le réseau routier et les émissions de gaz à effet de serre (GES) (Kuznetsova, Cardin, Diao, & Zhang, 2019).

Au regard de tous ces éléments, la réduction de la distance nécessaire pour collecter et transporter les MR peut ainsi jouer un rôle dans la réduction des GES. Une optique de réduction de ces distances se pose dans une approche décentralisée des infrastructures qui tend à rapprocher les centres de traitement (tri, conditionnement, recyclage et valorisation) de leurs gisements (Kuznetsova et al., 2019; Madden, Florin, Mohr, & Giurco, 2021).

Le présent projet de recherche vise à caractériser les limites et les performances de la décentralisation des MR dans un contexte territorial. Trois sous-objectifs découlent de l'objectif principal, soit :

- Élaborer un profil de génération des MR par tronçon;
- Identifier la performance environnementale associée au nombre de centres de conditionnement déployés dans le territoire;
- Caractériser les facteurs déterminants qui influencent la performance environnementale et économique des scénarios de décentralisation.

Ce projet énonce, pour hypothèse, qu'il existe un nombre de centres de conditionnement optimal qui améliore les émissions de GES à moindre coût ajouté. Il s'applique dans une étude de cas qui étudie Montréal et la collecte des MRrec.

Ce mémoire documente l'ensemble du projet de recherche. Le premier chapitre est consacré à la revue des connaissances actuelles en lien avec le sujet d'étude. Ce chapitre aborde à la fois les notions de la GMR et de la modélisation de tels systèmes. Ensuite, le deuxième chapitre détaille l'approche méthodologique de la recherche. Notamment, ce chapitre précise les caractéristiques du modèle développé. Le troisième chapitre traite des résultats obtenus à l'aide de l'approche méthodologique. Ce chapitre conclut notamment par le diagnostic sur l'approche décentralisée. Finalement, le quatrième et dernier chapitre propose une discussion élargie sur les résultats et aborde les retombées potentielles de ce projet.

CHAPITRE 1

ÉTAT DES CONNAISSANCES

Une matière résiduelle (MR) se définit comme toute matière ou tout objet destiné à l'abandon (RECYC-QUÉBEC, s.d.-c). Cette définition générique englobe toute forme de rejet, dont ceux issus de la production des biens de consommation (ADEME, Devauze, Koite, Chretien, & Monier, 2022). Le mot « matière » suggère un potentiel économique et place la MR plutôt comme une ressource à exploiter, notamment par des activités de recyclage et de valorisation. Elle permettrait donc la création de ressources, nommées la matière secondaire, et d'emplois (ADEME et al., 2022; Kuznetsova et al., 2019). Elle minimise également la présence de résidus ultimes, qui sont des MR qui ne peuvent être appliqués à la gestion des matières résiduelles (GMR) aux conditions techniques et économiques actuelles (RECYC-QUÉBEC, s.d.-c)

Historiquement, le terme de MR provient d'un rapport du Bureau d'audience publique pour l'environnement (BAPE). Cet organisme mentionne qu'une MR non gérée pouvait causer des problèmes environnementaux et qu'il convenait ainsi d'élaborer une GMR (Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 1997). Le BAPE, à ce moment, mentionnait déjà la vision linéaire des processus (1997) qui consiste à produire, à consommer et à jeter (RECYC-QUÉBEC, 2021). Cette note historique montre une forme d'avant-gardisme alors que l'économie circulaire devient une idée émergente sur la gestion des ressources, notamment (Calisto Friant, Vermeulen, & Salomone, 2020; Nikas et al., 2022). Dans cette même optique, un terme similaire aux MR a été employé en Australie dans une politique sur l'économie circulaire (Madden et al., 2021).

Ce chapitre vise à approfondir la notion de MR et de GMR à l'aide d'un état des connaissances actuelles. Dans un premier temps, il se concentre sur la caractérisation des MR pour en dresser un portrait plus complet que cette présente introduction. Ensuite, il couvre les éléments relatifs

à la GMR. Finalement, il aborde la prise de décision à l'aide des indicateurs de performances et de la modélisation.

1.1 Caractérisation des matières résiduelles

La GMR nécessite, au préalable, de comprendre les MR (Aziz & Abu Amr, 2020). Conséquemment, cette section se concentre sur la caractérisation des MR. Elle étudie notamment les MR du Québec et de la France et les mets en relation sur les données globales du rapport What a Waste 2.0 (Kaza et al., 2018). Le Québec est situé dans la région de l'Amérique du Nord dans ce rapport tandis que la France est située dans l'Europe et l'Asie centrale (Kaza et al., 2018). La section présente d'abord comment les MR peuvent être catégorisées. Puis, elle présente la mesure de ces derniers pour finalement aborder les impacts environnementaux des MR.

1.1.1 Catégories de matières résiduelles

Grâce à sa définition générique, les MR peuvent se catégoriser de plusieurs façons selon leur nature et leur emplacement territorial (Poulin, Bouzenot, & Cartoux, 2021; RECYC-QUÉBEC, 2009, s.d.-c) ou, au sein d'un même territoire, selon différents secteurs (Bourque, 2010; RECYC-QUÉBEC, 2009, s.d.-c). La catégorisation apporte aussi la notion de filière de GMR puisqu'une catégorie nécessitera, notamment, un traitement propre à celle-ci. Dans cette optique, la Figure 1.1 propose une catégorisation des MR sur le territoire québécois.

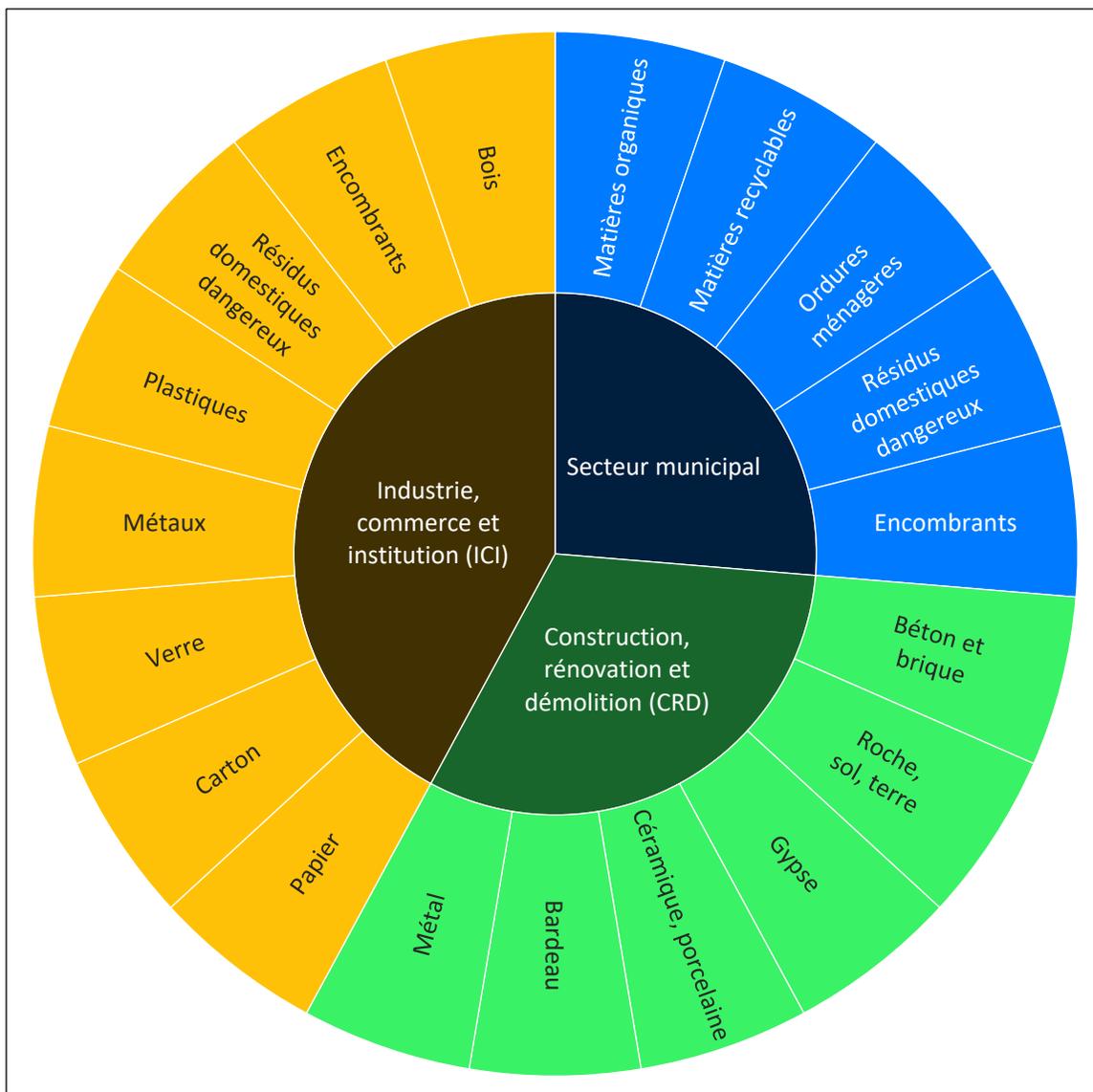


Figure 1.1 Catégorisations de matières résiduelles au Québec
Adapté de Bourque (2010) et de RECYC-QUÉBEC (2009, s.d.-c)

Dans la catégorisation de la Figure 1.1, certaines catégories peuvent s'apparenter aux autres. Notamment, dans le secteur des industries, commerces et institutions (ICI), la catégorisation proposée ressemble à une catégorisation plus détaillée que le secteur municipal. En outre, plusieurs de ces matières, comme les plastiques, les métaux, le verre, le carton et le papier, sont considérées comme recyclables (ADEME et al., 2022). Également, bien qu'elle constitue

un secteur à part entière, une personne pourrait générer des résidus de construction, de rénovation ou de démolition (CRD) en accomplissant des travaux à domicile, notamment. Pour approfondir les catégories de la Figure 1.1, le Tableau 1.1 propose une définition des catégories de MR pour le Québec et la France.

Tableau 1.1 Catégories de matières résiduelles du secteur municipal sur deux contextes territoriaux

Catégorie (France)	Catégorie (Québec)	Définition	Référence
Autres collectes spécifiques	Résidus domestiques dangereux	« Produits toxiques d’usage courant »	(Ville de Montréal, s.d.)
	Encombrants	« Objets qui, en raison de leur grande taille, ne peuvent être éliminés avec les ordures ménagères [...]. »	(RECYC-QUÉBEC, s.d.-c)
Biodéchets	Matière organique	Matières, généralement vivantes, qui peuvent être décomposée	(Poulin et al., 2021; RECYC-QUÉBEC, s.d.-c)
Matériaux recyclables	Matière recyclable	Matière qui peut retourner dans la chaîne de valeur afin de fabriquer de nouveaux produits	
Ordures ménagères résiduelles	Ordures ménagères	Matières qui ne peuvent être ni recyclé ni valorisé	

Dans le Tableau 1.1, la catégorisation française est fournie par l’ADEME. Cependant, il est à noter que l’ADEME emploie plutôt le terme de déchet (Poulin et al., 2021). Sur le territoire québécois, les matières recyclables (MRec) sont couramment associés à un bac de récupération bleu ou vert, les matières organiques (MO) sont associés à un bac brun et les OM sont associés à une poubelle (RECYC-QUÉBEC, s.d.-b).

1.1.2 Quantités de matières générées

La mesure des quantités de MR est réalisée par la masse (Kaza et al., 2018; Poulin et al., 2021; RECYC-QUÉBEC, 2020). Corolairement, les données publiées sont généralement exprimées

en tonnes pour une échelle territoriale (Hoornweg & Bhada-Tata, 2012; Poulin et al., 2021; RECYC-QUÉBEC, 2020; Ville de Montréal, 2013e).

Mondialement, les MR générées atteignaient 1,30 Gt en 2012 (Hoornweg & Bhada-Tata, 2012) et 2,01 Gt en 2016 (Kaza et al., 2018), une tendance à la hausse qui s'observe également à Montréal au fil des années (Ville de Montréal, 2013e). De plus, en 2018, le rapport What a Waste 2.0 rapportait que l'Amérique du Nord produisait le plus haut taux de génération de MR (2,21 kg/pers./jour) alors que le plus faible taux se trouve en Afrique subsaharienne (0,46 kg/pers./jour) (Kaza et al., 2018). Dans ces estimations, l'Europe et l'Asie centrale se classaient deuxièmes (1,18 kg/pers/an) (Kaza et al., 2018). Pour reprendre les territoires étudiés par la présente section, la Figure 1.2 propose le taux de collecté par le secteur municipal selon le territoire (Agglomération de Montréal, Québec, France) et la catégorie (MRec, MO, OM).

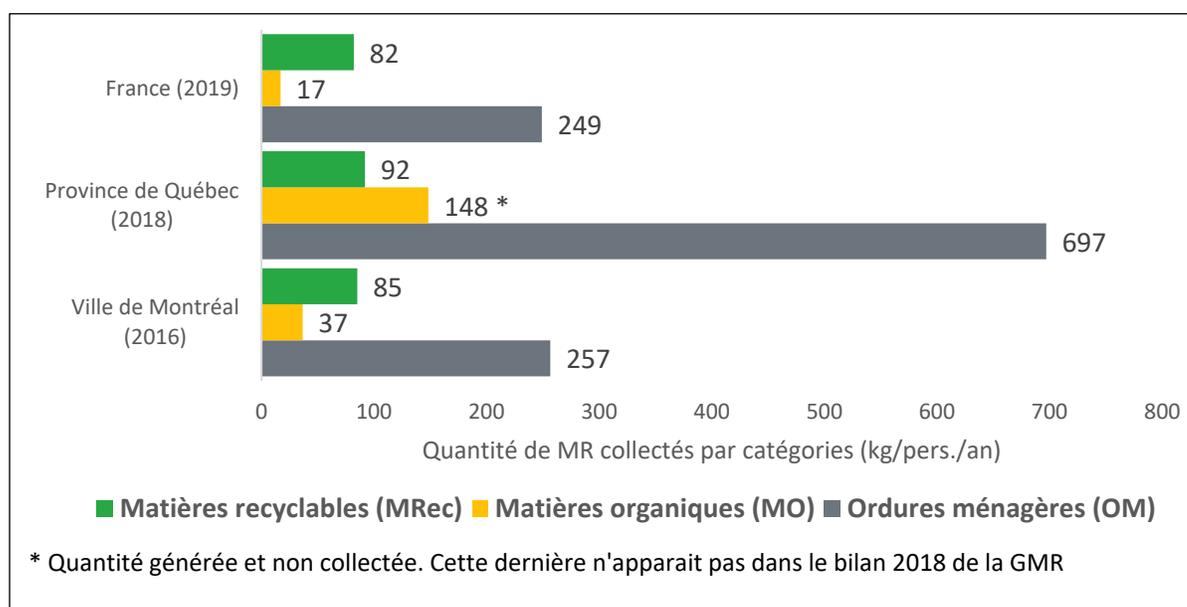


Figure 1.2 Quantités annuelles de matières résiduelles collectées du secteur municipal par personnes selon les catégories et les territoires
Adapté de Montréal en statistiques (2019), de Poulin et al. (2021), de RECYC-QUÉBEC (2020) et de Ville de Montréal (2013e)

Dans la Figure 1.2, l'année de référence des données est aussi indiquée pour tenir compte des écarts entre les dates de publications des différentes données. La valeur générée, représentée par l'astérisque, pourrait suggérer une surreprésentation de la présence des MO pour le territoire québécois. En comparaison, 387 000 t de MO ont été valorisées, une valeur équivalente à 46,1 kg/pers/an (RECYC-QUÉBEC, 2020). La Figure 1.2 suggère aussi que la Ville de Montréal se situe en dessous de la moyenne québécoise, ce qui va à l'encontre de la tendance globale qu'un milieu urbain tend à générer plus de MR qu'un milieu rural (Kaza et al., 2018). Montréal semble ainsi s'apparenter davantage à la moyenne française. En dehors de l'échelle territoriale, l'écart entre la France et le Québec à propos des MR générées suivent le même écart entre l'Europe et l'Amérique du nord (Kaza et al., 2018). Cependant, les valeurs de Figure 1.2 expriment des quantités absolues. Or, plus de MRec et MO peuvent entraîner une plus grande valorisation de ces matières (Leonard, 2003). En contrepartie, plus d'OM peuvent accentuer des enjeux environnementaux (Lou & Nair, 2009). Pour mettre en relation les valeurs absolues des différentes catégories de MR, la Figure 1.3 illustre la proportion relative de la génération de chacune d'elles.

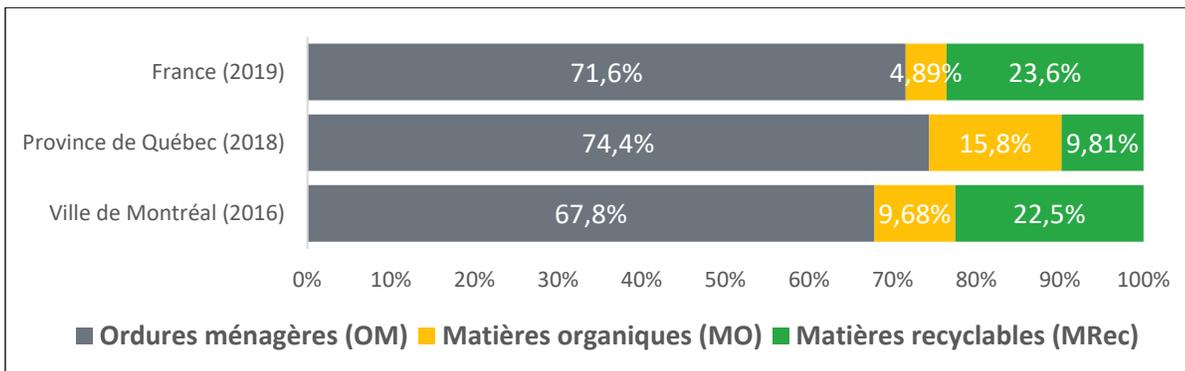


Figure 1.3 Proportion des matières résiduelles générées selon le territoire

Les proportions suggérées par la Figure 1.3 montrent notamment une tendance plus faible à générer des OM à la Ville de Montréal vis-à-vis des autres catégories, en comparaison aux autres territoires. Similairement, la population québécoise tend à générer davantage d'OM. En France, une tendance semble plus forte sur la génération de MRec. Comme l'illustre les

données de la Figure 1.3, le territoire doit être considéré comme facteur de variation de MR (Cheniti, Cheniti, & Brahamia, 2021; Kaza et al., 2018; Tanguy, Glaus, Laforest, Villot, & Hausler, 2016).

1.1.3 Enjeux environnementaux des matières résiduelles

Sur le plan environnemental, les MR posent des enjeux sur les émissions de gaz à effet de serre (GES), la contamination des sols, la protection de l'eau, la qualité de l'air et la santé publique (Aziz & Abu Amr, 2020; Lou & Nair, 2009). Ces enjeux deviennent exacerbés par la croissance de la population urbaine (Kuznetsova et al., 2019). Plus particulièrement, au niveau des émissions atmosphériques, la GMR représente 5 % des émissions de GES mondiales (Lou & Nair, 2009) tandis qu'il représentait 4 % des émissions de GES de la communauté métropolitaine de Montréal en 2006 (Communauté métropolitaine de Montréal, 2012).

Le Tableau 1.2 présente les enjeux environnementaux et les mesures d'atténuation en lien avec la collecte et le transport des MR. La collecte et le transport sont définis comme l'action de récupérer les MR à des endroits précis pour les amener vers leur lieu de traitement ou d'élimination (Chang & Pires, 2015).

Tableau 1.2 Enjeux environnementaux et mesures d'atténuation associés à la collecte et au transport des matières résiduelles

Enjeux	Mesures d'atténuation	Références
Émissions de GES	Bonnes pratiques de planification d'itinéraires	(Duzgun, Uskay, & Aksoy, 2016; Kuznetsova et al., 2019; Lou & Nair, 2009; Tanguy et al., 2017)
Qualité de l'air	Changer le mode de collecte ou la motorisation	(Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation, 2021)

Les enjeux du Tableau 1.2 sont accentués lorsqu'on considère une collecte à plusieurs voies, soit une collecte par un véhicule distinct pour chaque catégorie de MR (RECYC-QUÉBEC, s.d.-c). Cette technique de collecte nécessite de multiplier le nombre de véhicules qui déplacent des MR. Cet accroissement de déplacements de MR augmente la pression sur le réseau routier,

qui alimente à son tour les impacts engendrés par les émissions atmosphériques, comme les changements climatiques et la dégradation de la qualité de l'air.

Le Tableau 1.3 présente les impacts environnementaux associés aux MRec. Une filière typique d'une MRec se définit habituellement par une étape de tri, de conditionnement et de recyclage, qui peuvent être dans un à trois centres distincts (Éco Entreprises Québec & RECYC-QUÉBEC, 2020).

Tableau 1.3 Enjeux environnementaux et mesures d'atténuation et de traitement associés à la gestion des matières recyclables

Enjeux potentiels	Mesures d'atténuation	Mesures de traitement	Références
Émissions de GES	S. O.	Conditionnement au centre de recyclage	(RECYC-QUÉBEC, 2020, s.d.-c)
Production de rejets	Campagnes de sensibilisation envers la population	Valorisation des rejets lorsqu'applicable	(ADEME et al., 2022; RECYC-QUÉBEC, 2020)

Le nombre et la disposition spatiale des centres de traitement peuvent influencer les impacts environnementaux engendrés par la collecte et le transport, notamment en regard du déploiement de la flotte de véhicules nécessaires pour alimenter la filière de MRec (Höke & Yalcinkaya, 2021; Kuznetsova et al., 2019; Tanguy et al., 2016). De plus, la présence de ces centres permet la génération de matière secondaire qui diminue l'utilisation de matières premières et pourrait ainsi diminuer les GES (ADEME et al., 2022; Nikas et al., 2022).

Sur le plan des MO, le Tableau 1.4 propose des mesures d'atténuation pour les émissions de GES. Une filière typique de MO se caractérise par une étape de valorisation. Or, l'efficacité environnementale de cette valorisation demeure incertaine (Lou & Nair, 2009).

Tableau 1.4 Impacts environnementaux et mesures d'atténuation associés à la gestion des matières organiques

Impacts potentiels	Mesures d'atténuation	Références
Émissions de GES	Approbation des centres de compostage	(Gouvernement du Québec, 2021)
	Choix des technologies	(Lou & Nair, 2009)

Pour les OM, la stratégie favorisée demeure l'enfouissement (Lou & Nair, 2009). Le Tableau 1.5 détaille les impacts environnementaux associés aux OM.

Tableau 1.5 Impacts environnementaux et mesures d'atténuation et de traitement associés à la gestion des ordures ménagères

Impacts potentiels	Mesures d'atténuation	Mesures de traitement	Références
Émissions de GES	Détournement des MO par la valorisation	Recouvrement avec des MO	(Lou & Nair, 2009)
		Valorisation énergétique du méthane	
		Décomposition des OM avec du lixiviat	
Contamination des sols	Détournement des MO par la valorisation	Réhabilitation des sols	(Lou & Nair, 2009; Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation, 2021)
Pollution des eaux par le lixiviat	S. O.	Captation et traitement du lixiviat	(Aziz & Abu Amr, 2020; Lou & Nair, 2009; Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation, 2021)
Qualité de l'air	Détournement des MRec et les MO	S. O.	(Aziz & Abu Amr, 2020)

La portion organique des MR présentes dans un site d'enfouissement influence le bilan environnemental des OM (Lou & Nair, 2009). Or, l'utilisation de plusieurs filières peut aider à mitiger les impacts environnementaux du Tableau 1.5. En outre, si la mise en place de ces filières favorise le recyclage des MRec et la valorisation des MO, celui-ci peut réduire la

portion organique dans un site d'enfouissement. Conséquemment, elle vient contrer les enjeux de contamination des sols et de pollution de l'eau. D'ailleurs, le détournement détient l'avantage de réduire le nombre de sites d'enfouissement. Pour illustrer ces effets positifs, le Tableau 1.6 présente des exemples de retombées du détournement des MRec et des MO de l'enfouissement dans différents pays.

Tableau 1.6 Retombées du détournement des matières recyclables et des matières organiques de l'enfouissement
Adapté de Kuznetsova et al. (2019)

Emplacement	Retombées
Japon	Réduction de l'élimination. Le taux de l'élimination est inférieur à 11 %
Corée du sud	Réduction du taux d'enfouissement de 90 % (années '80) à moins de 10 %. Augmentation du taux de recyclage de 80 %.
Allemagne	Réduction du nombre de site d'enfouissements, passant de 50 000 sites (années '50) à 300 (2016)
Belgique	Taux de valorisation à 75 %

Le Tableau 1.6 suggère une tendance à considérer la mise en œuvre de filières pour se défaire de la vision linéaire traditionnelle. Or, bien que cette tendance semble favorable, les différentes approches de tri, de conditionnement et de valorisation possèdent leurs propres limites. Notamment, au Québec, 24 % des MRec triées ne sont pas acheminées au recyclage ou à la valorisation (RECYC-QUÉBEC, 2020).

1.2 Processus de gestion intégrée des matières résiduelles

RECYC-QUÉBEC considère la GMR comme un secteur à part entière (2020). D'un point de vue systémique, la GMR se définit comme un ensemble de processus pour traiter les MR. Ce processus peut considérer l'aspect dynamique et systémique en plus de l'approche en réseau, notamment présente dans la gestion dynamique des déchets (Rojo, 2009).

Au Québec, la GMR a pour objectif de réduire le gaspillage des ressources naturelles et l'élimination (Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 1997; RECYC-QUÉBEC, 2020). Elle permet également la production d'une matière secondaire qui remplace une matière première à la fabrication de produits (ADEME et al., 2022). D'ailleurs, par la loi, les municipalités sont amenées à développer un plan de GMR en accord avec les politiques gouvernementales (Gouvernement du Québec, 2021). En revanche, la municipalité planifie la GMR sur un plan macro, mais confie la gestion micro à des entreprises qui suivent le plan micro (Ma et al., 2021).

La notion de GMR implique une notion de hiérarchie. Notamment, en 1989, la politique de gestion des déchets solides a introduit le concept des 3R-V : réduction à la source, réemploi, recyclage et valorisation (Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 1997). Ce concept est similairement utilisé au Canada avec les 3R (Environnement et Changement climatique Canada, 2007). Avec l'approche Zéro déchets, le concept de 5R : refuser, réduire, réutiliser ou réparer, recycler et redonner à la terre est mis de l'avant (MRC des Pays-d'en-Haut, 2021). Hausler (1999) critique cette notion de hiérarchie. Il propose plutôt une notion de dynamique dans la gestion des MR à l'aide des 4R-VD (réduction, récupération, réutilisation, recyclage, valorisation et disposition), comme décrite à la Figure 1.4.

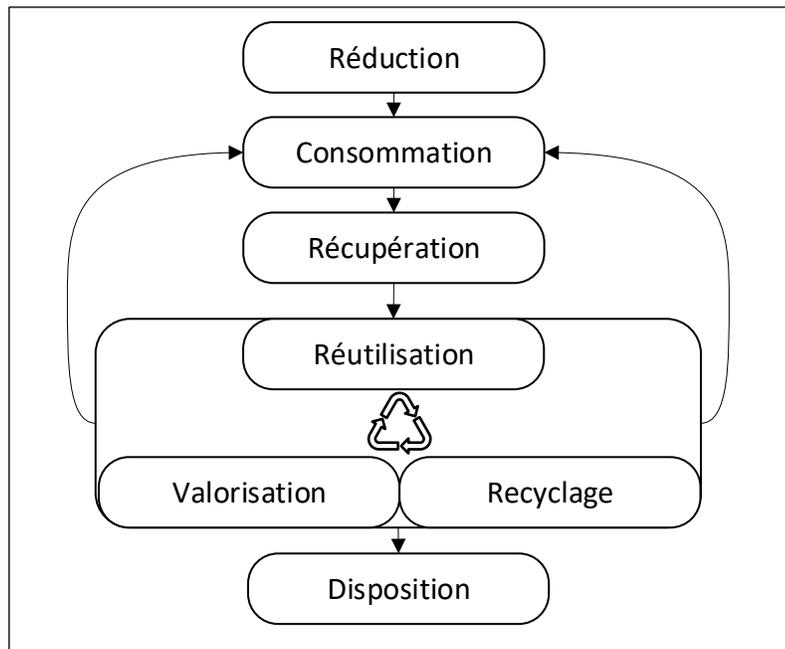


Figure 1.4 Dynamique des 4R-VD
Adapté de Hausler (1999)

Les 4R-VD incluent le transport des MR entre chaque élément de la dynamique, comme le montrent les flèches de la Figure 1.4. Pour compléter sur la notion de GMR, le Tableau 1.7 présente les processus de GMR en s'inspirant des 4R-VD. Pour chaque processus, l'élément de dynamique est également fourni entre parenthèses lorsque le nom est différent.

Tableau 1.7 Processus de gestion des matières résiduelles

Processus	Définition
Génération (Consommation)	Production de MR à la suite de la consommation de biens par des individus
Collecte et transport (Récupération)	Récupération des MR à des endroits précis pour les amener vers leur lieu de traitement ou d'élimination (Chang & Pires, 2015).
Transport (S. O.)	Processus distinct qui intervient généralement entre les étapes de la GMR. Par exemple, l'action de poser les MR sur le trottoir implique le transport de la MR d'un gisement à la bordure d'une rue.
Conditionnement (S. O.)	Procédés qui préparent les MR au recyclage, à la valorisation ou à l'élimination (RECYC-QUÉBEC, s.d.-c).

Valorisation	Utilisation des MR pour produire une matière secondaire qui détourne de l'élimination, mais qui s'emploie dans un cycle de production différent que la MR (RECYC-QUÉBEC, s.d.-c).
Recyclage	Introduction des MRec pour produire une matière secondaire qui s'emploie dans un même cycle de production et qui remplace la matière première (RECYC-QUÉBEC, s.d.-c).
Élimination (Disposition)	Traitement des résidus ultimes, de manière à ce qu'ils n'engendrent aucun impact environnemental (RECYC-QUÉBEC, s.d.-c).

Les processus de conditionnement, de valorisation, de recyclage et d'élimination du Tableau 1.7 peuvent se qualifier de processus de traitement. En outre, le conditionnement, qui peut inclure une étape de tri, retire les MR contaminés et les prépare pour l'acheminement vers les filières de recyclage ou de valorisation (ADEME, 2018; RECYC-QUÉBEC, s.d.-c). Au Québec, généralement, le tri est réalisé avant l'acheminement vers les filières alors que le conditionnement est réalisé à même le centre de recyclage (Éco Entreprises Québec & RECYC-QUÉBEC, 2020). Le recyclage, la valorisation ou l'élimination appliquent une dernière série de traitement dans l'objectif de créer une matière secondaire ou d'éliminer le résidu ultime (RECYC-QUÉBEC, 2020). Pour le recyclage, le procédé est propre à la filière (ADEME et al., 2022). Pour la valorisation, les procédés mis en place consistent généralement du compostage et de la biométhanisation des MO (RECYC-QUÉBEC, s.d.-c). Le compost, notamment, est généralement utilisé pour la fabrication de terreaux (RECYC-QUÉBEC, 2020) alors que le biométhane remplace le méthane d'origine fossile (RECYC-QUÉBEC, s.d.-a). En contrepartie, l'élimination s'applique davantage avec des OM.

L'inventaire non exhaustif des méthodes fournit un aperçu des possibilités, qui peuvent varier selon le territoire. Le développement d'une GMR nécessite donc de considérer son contexte territorial (Aziz & Abu Amr, 2020; Cheniti et al., 2021). Dans cette optique, la suite de cette section présente et approfondit des éléments de la GMR. Elle aborde la génération, la collecte et le traitement dans une perspective spatiale.

1.2.1 Profils de génération des matières résiduelles dans un contexte territorial

Bien que les MR soient catégorisées et mesurées, différents organismes, responsables d'établir des rapports sur la performance de la GMR, produisent généralement des bilans de masse globaux (Kaza et al., 2018; Madden et al., 2021; RECYC-QUÉBEC, 2020; Ville de Montréal, 2013e). En contrepartie, une mesure par personne ou par ménage demeure une donnée coûteuse à obtenir (Madden et al., 2021). Pour obtenir cette donnée, quatre techniques permettent de les estimer à moindre coût : les mesures *in situ* sur un échantillon de ménages (Rhyner, 1992), les sondages (Cheniti et al., 2021), l'extrapolation statistique par croisements de données de MR et de données socioéconomiques et démographiques (Johnstone & Labonne, 2004) ou la prédiction par l'intelligence artificielle (Batur, Cihan, Korucu, Bektaş, & Keskinler, 2020; Dai, Nie, & Chen, 2020). Chacune des techniques peut générer des données spatialisées qui favorisent la cartographie et améliorent la planification adéquate de la GMR. Dans cette optique, cette génération peut être vue comme un gisement de MR. La densité de ce gisement tend à suivre celle de la population (Cheniti et al., 2021). Par ailleurs, l'extrapolation statistique et la prédiction par l'intelligence artificielle nécessitent une forme de désagrégation d'un bilan massique (Dai et al., 2020; Madden et al., 2021) qui s'obtient par la modélisation.

Les méthodes peuvent considérer les facteurs qui font varier la génération des MR. Ces facteurs demeurent diversifiés, comme le revenu, la taille du ménage, le niveau de vie, la densité de la population, le degré d'éducation, l'âge, les coutumes, le type de logement ou le moment dans l'année (Cheniti et al., 2021; Éco Entreprises Québec & RECYC-QUÉBEC, 2021; Johnstone & Labonne, 2004; Madden et al., 2021; Rhyner, 1992). Or, dans une perspective territoriale, certains de ces facteurs peuvent être implicitement pris en compte. En outre, le revenu peut s'intégrer, implicitement, au bilan de masse par arrondissement puisque certaines tranches de revenus tendent à se regrouper dans certains arrondissements (Cheniti et al., 2021; Madden et al., 2021). Dans cette même optique d'intégration, Rhyner (1992) a mesuré les MR reçues dans un site d'enfouissement du comté de Brown aux États-Unis. Cela a permis de dresser une variation mensuelle des MR. Le type de logement, plus précisément, considère la tendance

d'une maison à générer, en moyenne, plus de MR qu'un appartement (Madden et al., 2021), notamment par la présence d'un ménage plus grand (Éco Entreprises Québec & RECYC-QUÉBEC, 2021). Par exemple, en Australie, une maison tend à générer 1,7 à 2,8 fois plus de MR qu'un appartement (Madden et al., 2021). Au Québec, pour les MRec, ce rapport peut être situé entre 1,25 à 1,27 fois en milieu urbain (Éco Entreprises Québec & RECYC-QUÉBEC, 2021). Le Tableau 1.8 présente ces taux.

Tableau 1.8 Taux de génération des matières recyclables
selon le type de logement au Québec
Adapté d'Éco Entreprises Québec & RECYC-QUÉBEC (2021)

Type de logement	Quantité de MRec générées (kg/personne/an)	Taux multiplicatif par rapport à la plus basse valeur
Unifamilial urbain	79	1,61
Unifamilial rural	76	1,55
Plex	61	1,29
Multilogement	49	

Au Tableau 1.8, un plex signifie un bâtiment résidentiel qui possède entre deux et cinq logements alors qu'un multilogement est composé de six logements et plus (Éco Entreprises Québec & RECYC-QUÉBEC, 2021). Le Tableau 1.8 suggère une tendance à générer plus de MR en milieu urbain, tendance observée ailleurs dans le monde (Kaza et al., 2018).

1.2.2 Collecte et transport des matières résiduelles : modes et planifications

Le processus de collecte et de transport des MR se définit notamment selon le nombre de voies collectées et le mode de collecte. Ce nombre de voies, au Québec, englobe, respectivement, les MO, les MRec et les OM (RECYC-QUÉBEC, s.d.-c). Une collecte à une voie récupère seulement les OM, ce qui correspond à la vision linéaire (RECYC-QUÉBEC, 2021). Plusieurs voies amènent un tri à la source du gisement qui sépare les MR selon leurs catégories (Lou & Nair, 2009; RECYC-QUÉBEC, s.d.-c). Ce tri permet une meilleure GMR s'il est efficace et si

le bon nombre de voies est posé (ADEME, 2018). Pour le choix du mode de collecte, le Tableau 1.9 présente les différents modes possibles.

Tableau 1.9 Définitions de certains modes de collecte
Tiré d'Aziz & Abu Amr (2020)

Mode de collecte	Définition
Bacs communautaires	Mise en place de plusieurs bacs accessible sur le territoire. Les MR doivent être apportées à ce bac par le ménage.
Collecte porte-à-porte	Les MR sont collectées par des personnes qui les récupèrent devant le bâtiment.
Collecte en bloc	Un véhicule de collecte se déplace à un endroit précis. Une personne du ménage apporte la MR à ce lieu.
Collecte sur trottoir	Les MR sont déposées en bordure de rue afin d'être récupérées à un moment préétabli.

Le choix du mode de collecte dépend, notamment, du territoire et de la catégorie de MR. En outre, le bac communautaire est utilisé pour la récupération du textile au Québec (RECYC-QUÉBEC, s.d.-c) alors que la collecte sur trottoir est privilégiée pour les MR municipales. Les communautés rurales privilégient les bacs communautaires pour servir des zones résidentielles (Höke & Yalcinkaya, 2021). La collecte hebdomadaire sur trottoir est appliquée à Montréal pour les MRec, les MO et les OM et offre une flexibilité des ménages, puisqu'ils peuvent déposer leurs MR la veille, au soir (Ville de Montréal, 2021). Toujours à Montréal, les résidus domestiques dangereux (RDD) et les CRD, entre autres, sont généralement apportés à l'écocentre, une installation spécialisée pour leur collecte (Bourque, 2010; RECYC-QUÉBEC, s.d.-c). L'écocentre se rapproche donc de la collecte en bloc.

En dehors du choix du mode de collecte, le choix du véhicule peut être considéré. Les véhicules employés demeurent généralement des camions avec une certaine capacité (Höke & Yalcinkaya, 2021). Ces camions, en moyenne, présentent une consommation de carburant situé entre 0,25 et 1,00 L/km (Jaunich et al., 2016; Nguyen & Wilson, 2010). Plus particulièrement, Franco González, Gallardo Izquierdo, Commans, & Carlos, (2021) ont mesuré la

consommation de carburant de plusieurs itinéraires et ont établi une moyenne de 0,49 L/km et un écart-type de 0,080 L/km. Ces statistiques peuvent être reprises pour des bases comparatives. Les consommations rapportées se situent également dans les plages susmentionnées.

Après la collecte, les MR peuvent être acheminées vers un centre de transbordement avant leur trajet vers un centre de traitement (Höke & Yalcinkaya, 2021; Tanguy et al., 2016). Celui-ci permet un regroupement hiérarchique des MR. Ce regroupement peut également contribuer à la diminution de l'énergie nécessaire pour la collecte et le transport (Corbo & Glaus, 2019). Un centre de transbordement pourrait observer ces bénéfices puisque des camions de plus petite capacité remplissent des camions de plus grande capacité. En revanche, des contraintes réglementaires peuvent limiter les bienfaits environnementaux et économiques (Höke & Yalcinkaya, 2021).

1.2.3 Centres de traitement de matières résiduelles et configuration du territoire

Les centres de traitement détiennent une emprise territoriale. Par exemple, à la ville de Montréal, toutes les MRec municipales sont triées au Complexe environnemental de Saint-Michel (Ville de Montréal, 2020). Ceci correspond à une configuration centralisée du territoire. Selon Kuznetsova et al. (2019), celle-ci possède, comme défaut, une structure peu flexible qui augmente ses coûts et le nombre de véhicules alors que les MR collectées, pour une catégorie donnée, augmentent. Cette augmentation de véhicules demeure l'un des seuls mécanismes pour répondre à l'augmentation de MR même si ce mécanisme augmente la pression sur le réseau routier (Kuznetsova et al., 2019) en plus du manque de redondance en cas d'une panne. Or, la Ville de Montréal a mis en place des secteurs de collecte, un mécanisme non identifié par Kuznetsova et al., (2019). Chaque secteur, dont les superficies demeurent plus faibles que celles des arrondissements, possède un horaire spécifique réparti sur une semaine, ce qui permet de diviser la charge de la collecte (Ville de Montréal, 2013c) jusqu'à une limite de sept jours. Par ailleurs, l'augmentation des MR décrite précédemment peut être attribuable à une

augmentation de la consommation ou à un tri à la source plus efficace qui augmente les MRec et les MO et qui diminue les OM, notamment.

L'approche inverse de la décentralisation peut contrer les enjeux liés à l'augmentation des MR à collecter. Toujours selon Kuznetsova et al. (2019), cette approche consiste à déployer de plus petits centres qui peuvent traiter jusqu'à 1 000 000 fois moins de MR et pourraient ainsi réduire les distances de transport. Selon Madden et al. (2021), ces centres peuvent servir un territoire d'un rayon de cinq kilomètres. À titre de comparaison, la distinction de volume annuel de traitement entre un petit et un grand centre de tri au Québec se situe de 2 à 40 fois (Langlois-Blouin, Fontaine, Boies, & Turgeon, 2021). En revanche, la mise en place des centres doit tenir compte de contraintes et de règlements variés (Höke & Yalcinkaya, 2021; Kuznetsova et al., 2019; Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation, 2021). Par exemple, dans l'Agglomération de Montréal en 2011, seuls 10,1 % du territoire zoné industriel était inoccupé (Communauté métropolitaine de Montréal, 2012).

L'emplacement d'un centre de traitement au sein d'un territoire urbain repose sur l'identification d'un ou de plusieurs lieux qui minimisent les distances parcourues par la collecte et le transport tout en minimisant l'exposition des nuisibles à la population (Kuznetsova et al., 2019; Ma et al., 2021). Les statistiques spatiales peuvent indiquer un point, dans le territoire, où se trouverait un centre de traitement potentiel (Richter et al., 2021). Le Tableau 1.10 résume quelques statistiques spatiales.

Tableau 1.10 Définitions de quelques statistiques spatiales

Statistique	Description	Référence
-------------	-------------	-----------

Centroïde	Centre d'un polygone géométrique	(Office québécois de la langue française, 2022)
Centre moyen	Point dont les coordonnées représentent la moyenne pour toutes les entités.	(Richter et al., 2021)
Centre moyen pondéré	Point dont les coordonnées représentent la moyenne pour toutes les entités, mais qui est pondéré par une autre propriété.	(ESRI, s.d.-a)
Entité centrale	Entité qui minimise la distance entre celle-ci et toutes les autres entités d'un même ensemble.	(Richter et al., 2021)

Pour rapprocher le centre de traitement des MR, le point calculé par les statistiques spatiales se base sur les données de génération de MR par gisement, donnée généralement absente (Madden et al., 2021). Ce point peut donc se baser sur l'emplacement des ménages (RECYC-QUÉBEC, s.d.-c). De plus, les MR suivent la densité de la population (Cheniti et al., 2021), ce qui permet de spatialiser la densité des gisements des MR. Cependant, la statistique spatiale en question peut potentiellement identifier un point inadéquat qui ne respecterait pas les contraintes réglementaires.

Lorsque ces points sont connus pour le territoire, la tessellation de Voronoï délimite les régions de collecte des centres (Richter et al., 2021). Or, cette méthode exclut la possibilité d'analyser la configuration du territoire. L'approche inverse peut néanmoins lever cette limitation. Elle consiste à élaborer les régions et calculer les statistiques spatiales. Ces régions peuvent s'établir en fonction du groupement d'entités territoriales. Or, le groupement optimal basé sur la distance est considéré comme un problème NP-Complet (Aloise, Deshpande, Hansen, & Papat, 2009). Il appartient ainsi à une famille de problèmes dont la solution ne peut être exécutée en temps raisonnable et de manière exacte pour un grand nombre de données (Cormen, 2009). Les solutions visent donc à établir un compromis sur l'exactitude des données afin d'obtenir des résultats en délais raisonnables (Cormen, 2009; Laguna & Martí, 2013). Plusieurs solutions approximatives existent pour ce problème et le choix de cette solution dépend des données reçues en entrées (Aggarwal, 2014). Le Tableau 1.11 présente les grandes familles de méthodes de groupements avec quelques algorithmes en guise d'exemple. Ces méthodes sont notamment

utilisées en intelligence artificielle et en apprentissage machine, qui étudient également le groupement des données (Aggarwal, 2014).

Tableau 1.11 Familles de méthodes de groupement des données
Adapté d'Aggarwal (2014)

Méthode	Description	Algorithmes
Probabiliste et générative	Étant donnée un certain nombre de distributions probabilistes, classer des entités aléatoires selon leur correspondance aux distributions	<i>Expectation Maximization</i>
Basé sur la distance (plat)	Groupement appliqué en une seule phase selon un ensemble de points fictifs qui représente le groupement. Ces points sont groupés selon leur distance vers le groupement et modifiés itérativement jusqu'à une convergence dudit point.	k-Moyennes, k-Médianes, k-Médoïdes
Basé sur la distance (hiérarchique)	Représentation des groupes selon un niveau hiérarchique d'une façon agglomérative (prendre les points individuels et les grouper ensemble) ou d'une façon divisiveuse (créer des groupes avec l'ensemble des données sous une forme hiérarchique)	<i>Single-linkage, all-pairs linkage, centroid-linkage, sampled-linkage</i> (agglomératif), k-Moyennes, k-Médianes, k-Médoïdes (diviseur)
Basé sur la densité	Grouper les points de données selon les regroupements naturels que forment les points et des formes arbitraires. En d'autres mots, une série de points proches les uns des autres sont groupés ensemble.	DBSCAN
Basé sur la grille	Sous-variante de la méthode basée sur la densité où les données sont également formées dans une structure en grille.	STING
Réduction de la dimensionnalité	Applicable sur le prétraitement et sur le groupement. La méthode consiste à réduire les liens entre les propriétés étudiées des paramètres.	<i>Expectation Maximization</i> , réduction matricielle, découpage spectral

De ces familles de méthode, les algorithmes plats basés sur la distance demeurent l'approche la plus flexible et la plus simple d'implémentation (Aggarwal, 2014). Plus particulièrement, la méthode k-Moyennes demeure l'une des méthodes les plus largement utilisées, mais le choix

des points de groupement initiaux et de la fonction de distance influencent le comportement de l'algorithme (Aggarwal, 2014; Arthur & Vassilvitskii, 2007). Dans cette optique, Arthur & Vassilvitskii (2007) ont conçu une méthode stochastique pour sélectionner ces points.

L'utilisation de la famille de réduction de la dimensionnalité vise à simplifier les données spatiales par la réduction du nombre de propriétés étudiées (Aggarwal, 2014). Elles peuvent également grouper les données. En particulier, le découpage spectral groupe les données selon un graphe $G = (V, E)$ non orienté et non pondéré. La matrice Laplacienne de ce graphe connecte ce dernier à l'algèbre linéaire, ce qui permet le calcul des valeurs propres λ et des vecteurs propres \vec{x}_λ tel que $|\vec{x}_\lambda| = |V|$ (Strang, 2019). La valeur propre de Fiedler, la plus petite valeur propre λ positive et non nulle, et son vecteur propre permettent un groupement des données en deux grappes (Strang, 2019). En effet, les composants positifs du vecteur propre suggèrent des nœuds d'une grappe tandis que les composants négatifs suggèrent les nœuds d'une autre (Strang, 2019). En revanche, le découpage spectral ne peut pas calculer par lui-même un découpage de plus de deux grappes (Liu & Han, 2014). Il ne pourrait pas diviser le territoire en trois parties, entre autres. Pour appliquer ce découpage, ce dernier nécessite de trier les valeurs propres λ positives et non nulles (Liu & Han, 2014; Strang, 2019). Les vecteurs propres \vec{x}_λ à ces valeurs propres λ constituent ainsi un nouveau jeu de données qui peut être alimenté à la famille d'approches basées sur la distance, comme k-Moyennes (Liu & Han, 2014). En revanche, un nombre trop élevé de groupements peut entraîner des anomalies dans les résultats (Strang, 2019).

En synthèse, les différents procédés de traitement doivent s'appliquer sur un lieu prédéterminé qui doit, notamment, considérer les contraintes techniques, spatiales et réglementaires. Avec l'omission de ces contraintes, les méthodes de groupement des données et les statistiques spatiales déterminent des points géographiques qui rapprochent le centre de traitement du gisement.

1.3 Démarche d'aide à la prise de décision

La prise de décision se définit comme une « action d'effectuer un choix entre plusieurs solutions, en fonction des objectifs fixés et compte tenu des informations dont on peut disposer » (Office québécois de la langue française, 2022). La prise de décision repose sur une cueillette de données pour caractériser les solutions potentielles et renseigner les indicateurs associés aux objectifs. La définition suggère aussi que les solutions potentielles sont préalablement établies. En revanche, les objectifs des parties prenantes peuvent être conflictuels (Kuznetsova et al., 2019).

Cette section se concentre sur les éléments de la prise de décision. Elle présente d'abord la modélisation comme méthode pour obtenir l'information nécessaire. Elle se termine avec les indicateurs utilisés pour évaluer la performance de la collecte et du transport.

1.3.1 Modélisation de la planification d'itinéraires de collecte

La collecte des MR s'établit à l'aide d'une planification des itinéraires de collecte. Cette planification peut s'accomplir à l'aide d'une modélisation. Formellement, la planification des itinéraires de collecte est applicable à la famille des problèmes de routage de véhicules (VRP) (Duzgun et al., 2016) et doit considérer la capacité d'un camion (Höke & Yalcinkaya, 2021). Le sous-problème plus particulier dépend des objectifs de modélisation et des données de départ. Dans cette optique, le Tableau 1.12 présente les caractéristiques associées au problème de routage de véhicule avec capacité (CVRP), au problème de routage d'arc avec capacité (CARP) (Lacomme, Prins, & Ramdane-Cherif, 2004) et au problème de routage avec capacité basé sur la localisation (CLRP) (Ma et al., 2021).

Tableau 1.12 Quelques modèles de planification d'itinéraires de collecte et caractéristiques associées

Modèle	Planification du territoire	Emplacement des gisements	Mode de collecte associé	Référence
CVRP	Exclue	Point déterminé	Bac communautaire	(Duzgun et al., 2016)
CARP	Exclue	Arête (Rue ou tronçon)	Collecte porte à porte et collecte et sur trottoir	(Lacomme et al., 2004)
CLRP	Inclue	Variable	Variable	(Ma et al., 2021)

Le CLRP considère à la fois le VRP et la localisation des centres de traitement des MR dans l'élaboration de sa solution (Ma et al., 2021), ce qui permet de choisir un des autres modèles du Tableau 1.12. Il permet une solution plus optimale que si ces deux éléments étaient traitées indépendamment (Salhi & Rand, 1989).

Formellement, le CARP et le CVRP visent à répondre à la question suivante : considérant un multigraphe $\Gamma = (V, E)$ orienté et pondéré, une flotte de véhicules avec une capacité donnée et un dépôt σ , quel est l'agencement d'itinéraires qui minimise le cout total et qui respecte la capacité de ladite flotte (Duzgun et al., 2016; Lacomme et al., 2004) ? Le cout total peut être un critère unique, comme le temps, la distance ou l'exposition à la population (Lacomme et al., 2004; Xue & Cao, 2016) ou multiobjectif. L'optimisation multiobjective consiste à trouver un compromis entre différents critères d'optimisation (Steuer, 2013). Le multigraphe possède un ensemble de nœuds V et d'arêtes E . Contrairement à un graphe $G = (V, E)$, le multigraphe permet que plusieurs arêtes connectent les mêmes paires de nœuds (Rahman, 2017). Également, la collecte des MR doit inclure deux couts : le cout pour collecter les MR de l'arête $e \in E$ et le cout pour traverser, sans collecter, ladite arête (Al-Jubori & Gazder, 2018; Lacomme et al., 2004). Le temps de passage peut se modéliser à l'aide de la vitesse moyenne sur un tronçon et la distance de ce dernier (Tanguy et al., 2017).

Le cout de collecte requiert notamment la quantité de MR à collecter (Everett, Maratha, Dorairaj, & Riley, 1998; Lacomme et al., 2004). Dans cette optique, l'étude d'Everett et al.

(1998) a modélisé le cout de collecte de MRec dans The Village en Oklahoma. Dans cette étude, seules les maisons unifamiliales sont considérées. En plus d'une erreur de 9,3 % sur la simulation, l'étude identifie les paramètres qui varient le temps de collecte : le nombre d'arrêts sur l'itinéraire (intersections et arrêts pour récupérer un bac), le temps nécessaire pour récupérer la MRec et la présence du tri à même le véhicule de collecte. Une des limitations de l'étude se trouve dans l'absence de la notion du multilogement du territoire sélectionné, pourtant présent dans les milieux urbains (Ville de Montréal, 2017).

La résolution du CARP, du CVRP et du CLRP est considérée comme un problème NP-Complet (Duzgun et al., 2016; Lacomme et al., 2004; Ma et al., 2021). Deux approches peuvent alors être utilisées, celles des heuristiques et celles des métaheuristiques.

Une heuristique décrit une procédure qui crée une solution jugée acceptable et potentiellement optimale (Laguna & Martí, 2013). Cette procédure demeure reliée au problème (Laguna & Martí, 2013), ce qui limite sa portée d'application. Notamment, le *Path-Scanning* (Golden, Dearmon, & Baker, 1983), l'*Augment-Merge* (Orloff, 1974) et l'heuristique d'Ulusoy (1985) peuvent résoudre le CARP avec certaines adaptations (Lacomme et al., 2004).

Les métaheuristiques décrivent plutôt une famille d'approches indépendantes du contexte du problème pour résoudre ce dernier, ce qui ressemble davantage à des stratégies de conception d'algorithmes (Sörensen & Glover, 2013). Contrairement aux heuristiques, elles détiennent une plus large portée d'application, comme la notion d'optimisation multiobjectif (Ahani, Arjmandi, Hoveidi, Ghodousi, & Miri Lavasani, 2019; Pourreza Movahed, Kabiri, Ranjbar, & Joda, 2020; Russo & Verda, 2020; Xue & Cao, 2016). Le Tableau 1.13 propose différents algorithmes métaheuristiques.

Tableau 1.13 Description d'approches métaheuristiques pour la résolution de problèmes NP-Complet

Algorithme	Description	Référence
Colonie de fourmis	Reproduire le comportement des fourmis afin de tracer une solution potentiellement minimale. Ce dernier s'accomplit par le renforcement positif des bons chemins.	(Dorigo, Maniezzo, & Colorni, 1996)
Recuit simulé	Reproduire le procédé de recuit en métallurgie afin de figer les éléments considérés minimaux et réduire les distances des autres éléments.	(Kirkpatrick, Gelatt, & Vecchi, 1983)
Recuit déterministe	Variante du recuit simulé dont la fonction de mise à jour utilisé par cette dernière est déterministe.	(Moscato & Fontanari, 1990)
Recherche taboue	Utiliser des heuristiques qui s'adaptent en fonction de de la recherche de la solution.	(Laguna, 2018)
Algorithme génétique	Reproduire les mécanismes d'ADN pour créer des générations de solution qui tendent vers la solution optimale.	(Sivanandam & Deepa, 2007)
Recherche locale	Changer itérativement, à l'aide de petites opérations, la solution à un problème de manière à ce qu'elle tende vers la solution optimale	(Sörensen & Glover, 2013)
Algorithme mémétique	Hybride entre l'algorithme génétique et la recherche locale. La mutation d'un chromosome s'accomplit par la recherche locale.	(Lacomme et al., 2004)

Comme le suggère le Tableau 1.13, les solutions peuvent être hybrides selon la méthode d'application. De plus, certaines métaheuristiques peuvent utiliser les heuristiques pour peupler leur bassin de solutions ou pour chercher la solution la plus intéressante (Lacomme et al., 2004; Laguna, 2018).

Théoriquement, les métaheuristiques semblent équivalentes dans leurs performances (Sörensen & Glover, 2013), c'est-à-dire qu'elles sont toutes en mesure d'atteindre une solution acceptable en délais raisonnables. De plus, aucun moyen ne permet de vérifier empiriquement la meilleure méthode et elles nécessitent tout de même des ajustements propres au problème (Sörensen & Glover, 2013). Entre autres, la résolution du CARP illustre ces limitations sous une forme de contradiction. En effet, Lacomme et al. (2004) suggèrent que l'algorithme

génétique paraît moins performant que sa version hybride, soit l'algorithme mémétique (AMém). En contrepartie, Al-Jubori et Gazder (2018) suggèrent l'utilisation de l'algorithme génétique ou des colonies de fourmis, couplés à l'utilisation de systèmes d'information géographiques. Finalement, Duzgun et al. (2016) rapportent que l'algorithme génétique apporte des résultats satisfaisants. Chaque métaheuristique possède ses paramètres d'exécutions et ces critères d'arrêts et de convergence (Sörensen & Glover, 2013). La détermination des valeurs de ces paramètres demeure une opération complexe pour laquelle aucune méthode générale ne paraît disponible, une autre limitation de l'approche (Sörensen & Glover, 2013). Cela étant, Eiben & Smit (2011) proposent une approche de détermination pour les algorithmes évolutifs, comme l'algorithme génétique et l'algorithme mémétique.

Les approches paraissent équivalentes. Ceci étant, l'analyse comparative d'algorithmes peut s'appuyer sur leur application à des bancs d'essais documentés (Belenguer & Benavent, 2003a; Lacomme et al., 2004). Nonobstant, le choix doit tout de même demeurer éclairé. Cette dernière peut être basée, entre autres, sur des attributs de qualités du génie logiciel, comme la testabilité et la performance (Bass, Clements, & Kazman, 2012), puisque ces algorithmes doivent être implémentés en éléments logiciels.

La testabilité fait référence à la capacité d'un système logiciel à montrer, par lui-même, la présence de fautes à l'intérieur de celui-ci (Bass et al., 2012). Une stratégie de test consiste à exécuter l'algorithme sur des bancs d'essai (Lacomme et al., 2004). D'ailleurs, les éléments de l'algorithme, si modulaires, pourront également faire l'objet de tests automatisés.

La performance fait référence à la vitesse à laquelle les résultats d'une opération peuvent être obtenus (Bass et al., 2012). La performance théorique peut se mesurer à l'aide de la notation O (Cormen, 2009). Cette notation dresse un ordre de grandeur du nombre de calculs nécessaire et de l'utilisation de la mémoire selon le volume de données traitées dans le pire cas (Cormen, 2009). Cette dernière se traduit en une complexité asymptotique. Lorsqu'elle est plus faible, elle suggère une exécution plus rapide (Cormen, 2009). Un dernier élément à considérer dans

cet attribut de qualité repose sur la possibilité de paralléliser ou non la donnée, puisque celle-ci permet d'améliorer la performance du programme (Peter, 2011) là où la complexité asymptotique présente ses limites.

1.3.2 Indicateurs utilisés dans l'évaluation de la collecte et du transport

Les indicateurs utilisés sont nombreux et varient selon les études et les processus de GMR. Chacun de ces indicateurs peut se rapporter à une dimension économique, environnementale ou sociale, c'est-à-dire à l'un des piliers du développement durable (Purvis, Mao, & Robinson, 2019).

Sur le plan environnemental, l'analyse de cycle de vie évalue les impacts environnementaux des différents produits en considérant tout son cycle de vie et différentes échelles territoriales (Guérin-Schneider, Tsanga-Tabi, Roux, Catel, & Biard, 2018). Cette approche, bien que complète, demeure plus englobante qu'un processus de collecte et de transport. Ce processus considère plusieurs produits (camions et centres de traitements) sur une échelle temporelle inférieure à la vie utile. Dans cette optique, Zsigraiova, Semiao, & Beijoco (2013) ont développé une méthode pour évaluer la performance environnementale et économique de la collecte et du transport du verre. Leur méthode adapte celle du *Methodology for Calculating Transport Emission and Energy Consumption* (MEET) (Transport Research Laboratory et al., 1999). Le MEET permet le calcul de la consommation de carburant et des principaux polluants atmosphériques (CO₂, CO, PM et HC) associés. (Transport Research Laboratory et al., 1999; Zsigraiova et al., 2013). Le MEET, bien qu'exhaustif, exclut, en revanche, certaines sources d'énergie, comme l'électricité (Transport Research Laboratory et al., 1999). L'étude de Zsigraiova et al., (2013) offre un point de départ pour l'utilisation du MEET avec un recensement des équations à utiliser pour l'évaluation environnementale du processus de collecte et de transport. Cette étude rapporte également la consommation d'énergie, mesurée en Wh.

Les indicateurs économiques se mesurent grâce à la finance et à la comptabilité. Néanmoins, les études tendent à considérer deux catégories de coûts : ceux d'exploitation et ceux d'investissements (Höke & Yalcinkaya, 2021; Kuznetsova et al., 2019; Tanguy et al., 2017; Zsigraiova et al., 2013). Un coût d'exploitation réfère à celui nécessaire pour opérer la GMR alors qu'un coût d'investissement réfère à celui nécessaire pour obtenir ou maintenir l'infrastructure de la GMR (Tanguy et al., 2017). Le Tableau 1.14 présente des indicateurs économiques selon les catégories susmentionnées.

Tableau 1.14 Indicateurs économiques utilisés pour la gestion de matières résiduelles

Indicateur	Catégorie	Unité de mesure	Référence
Utilisation du territoire	Exploitation	\$ /mois	(Kuznetsova et al., 2019)
Maintenance de l'équipement	Exploitation		(Höke & Yalcinkaya, 2021; Kuznetsova et al., 2019; Tanguy et al., 2017; Zsigraiova et al., 2013)
Assurance de l'équipement	Exploitation		
Salaires	Exploitation	\$/h	
Consommation d'énergie	Exploitation	\$	
Flux d'entrées	Exploitation		
Acquisition d'équipement	Investissement	\$/an	(Langlois-Blouin et al., 2021)
Coûts de bâtiment	Investissement		(Langlois-Blouin et al., 2021)

Plusieurs des indicateurs du Tableau 1.14 suggèrent une forme temporelle des coûts qui doit être uniformisée. Plus particulièrement, le calcul d'un indicateur doit annualiser les coûts d'investissements (Tanguy et al., 2017). D'ailleurs, pour le calcul d'un indicateur économique, ces indicateurs demeurent une composante d'un indicateur global. La présence de ces composants permet un calcul plus complet et plus fidèle de la réalité. Or, dans la mesure où l'élément est indifférent à la variation de longueur et de durée des itinéraires, l'analyse de scénarios peut exclure ces éléments.

La performance économique peut tenir compte des profits engendrés par la matière secondaire (Cheniti et al., 2021; Éco Entreprises Québec & RECYC-QUÉBEC, 2016; Kuznetsova et al., 2019; Tanguy et al., 2017). Elle peut également varier selon le territoire et les technologies employées (Kuznetsova et al., 2019; Lou & Nair, 2009) et le rejet. Entre autres, au Québec, plus la capacité d'un centre de tri augmente, plus il tend à produire des rejets (Langlois-Blouin et al., 2021).

La performance sociale peut notamment se poser quant à la relation entre un processus de GMR et la population. Notamment, les centres de traitement des MR, bien qu'utile à la population, sont généralement isolés de celles-ci pour réduire l'exposition des nuisibles à la population même si cela augmente les distances (Ma et al., 2021). Dans cette optique, Xue & Cao (2016) ont modélisé la planification d'itinéraires de transport de MR à Singapour de collecte dans l'objectif d'optimiser l'un des critères suivants : le temps de passage, le taux d'accident et l'exposition à la population. Le taux d'accident est basé sur une liste de tronçons à haut risque d'accident alors que l'exposition à la population consiste à éviter de déplacer un camion dans un secteur résidentiel ou commercial. Les résultats de cette étude suggèrent que, dépendamment du critère d'optimisation priorisé, les itinéraires sont portés à varier.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

L'approche méthodologique se concentre sur la modélisation du processus de collecte et de transport ainsi que sur l'analyse de la performance environnementale et économique des scénarios de décentralisations. Ce chapitre détaille les éléments de cette approche. Pour synthétiser cette approche, la Figure 2.1 illustre les différents éléments et les relations entre eux.

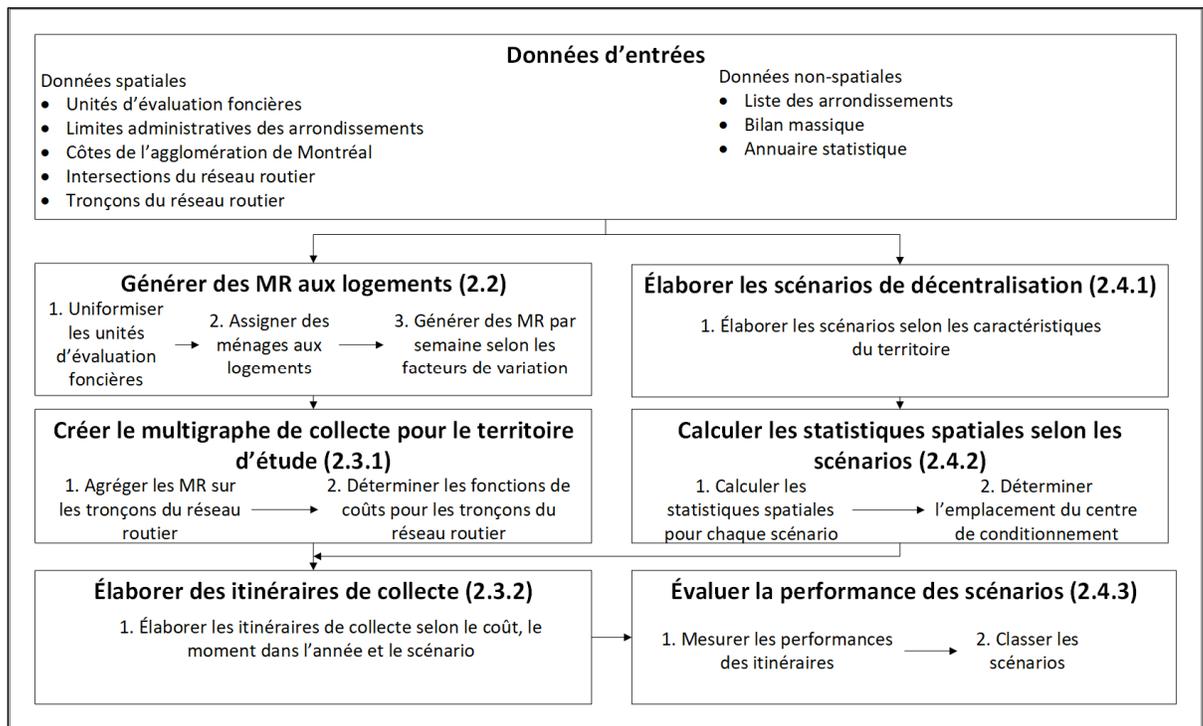


Figure 2.1 Approche méthodologique

Dans la Figure 2.1, chacun des éléments de l'approche est associé à une section du présent chapitre. Les cases donnent un élément global dont le contenu de la case est repris dans les sections. La méthodologie suppose que la scénarisation peut se dérouler en parallèle de la génération. Or, pour les itinéraires de collecte, celle-ci nécessite le graphe de collecte et

l'emplacement des centres. La section 2.1, absente de la Figure 2.1, présente l'étude de cas. Les sections suivantes présentent, respectivement, la génération des MR, la planification des itinéraires et de transport et l'évaluation de la performance.

2.1 Présentation de l'étude de cas

L'étude de cas est associée aux 19 arrondissements de la Ville de Montréal (Ville de Montréal, 2013a) et plus spécifiquement à sept arrondissements centraux : Anjou, Le Plateau-Mont-Royal, Outremont, Rosemont–La Petite-Patrie, Saint-Léonard, Ville-Marie et Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension. Les 19 arrondissements sont utilisés pour trouver les centres de conditionnement tandis que les sept arrondissements centraux sont utilisés pour la collecte et le transport. La Figure 2.2 illustre le territoire d'étude.

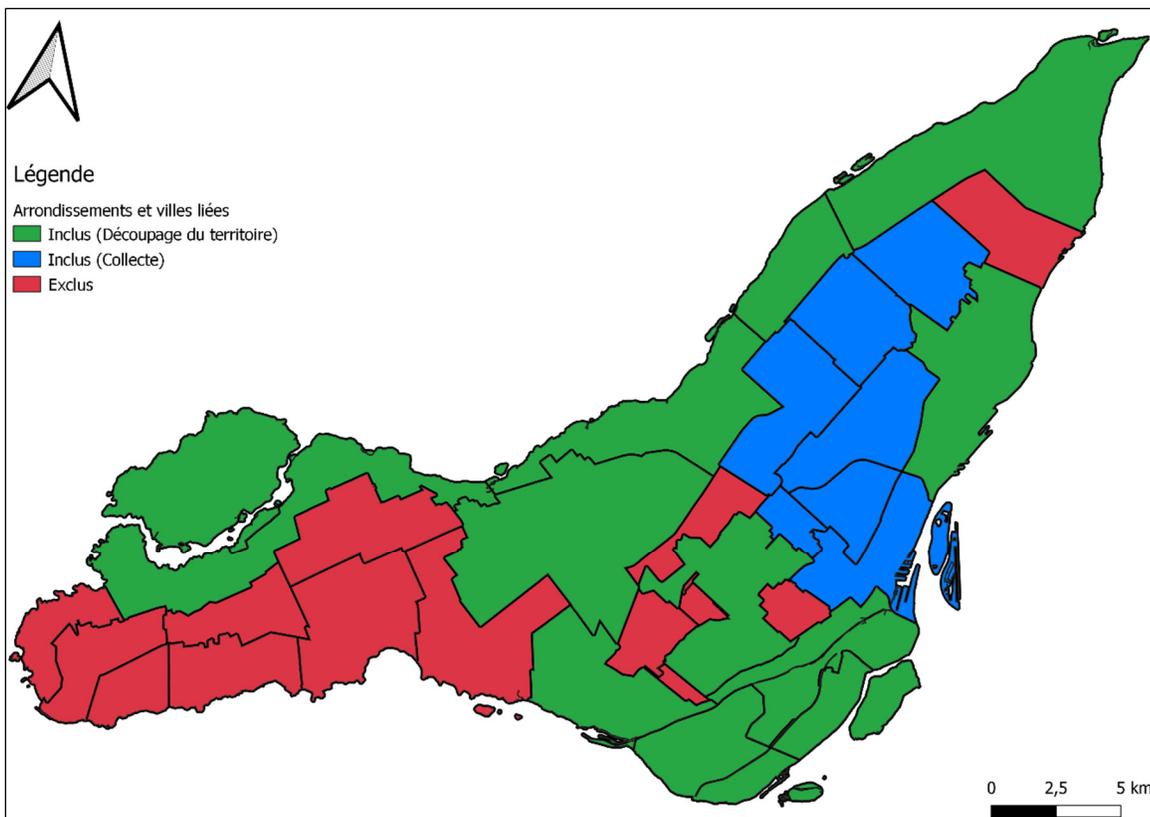


Figure 2.2 Territoire à l'étude

La Figure 2.2 montre l'agglomération de Montréal. Les zones en rouge correspondent à des villes liées. Les zones en vert et en bleu correspondent aux 19 arrondissements utilisés pour la localisation des centres de conditionnement. Les zones en bleue correspondent aux territoires pour la collecte et le transport (sous-territoire montréalais). Il est à noter que les représentations cartographiques subséquentes excluent les polygones des territoires exclus.

L'étude de cas consiste à caractériser l'influence de l'emplacement d'un centre de conditionnement sur la collecte et le transport et sur le transport vers un centre de traitement pour une semaine. Cette étude se concentre plus particulièrement sur la collecte des MRec et le transport du polytéréphtalate d'éthylène (PET) vers le Groupe Lavergne, un recycleur qui se trouve dans le territoire d'étude (Lavergne, Inc., 2019; Loubert, 2022). Les PET identifient ainsi un utilisateur final qui est indépendant tout au long de l'étude de cas. Ce même utilisateur permet aussi la convergence de toutes les MRec vers un lieu final, peu importe le scénario envisagé. Pour modéliser cette étude, le Tableau 2.1 propose les jeux de données nécessaires et les éléments méthodologiques qui utilisent le jeu de données.

Comme montré au Tableau 2.1, la liste des arrondissements, utilisés par plusieurs éléments, uniformise la nomenclature des arrondissements au travers des différents jeux de données de la Ville de Montréal. Pour les PET, puisque les données sont absentes, l'étude suppose que 1,50 % des MRec sortantes sont des PET sous l'hypothèse simplificatrice que chacune des sept sous-catégories de matières plastiques présente répartition égale sur la masse (RECYC-QUÉBEC, 2020). Cette simplification repose sur le fait que 10,5 % des matières plastiques étaient acheminées pour le recyclage (RECYC-QUÉBEC, 2020).

Tableau 2.1 Utilisation des jeux de données
de l'étude de cas par éléments méthodologiques

Jeu de données	Éléments méthodologiques	Référence
Liste des arrondissements	<ul style="list-style-type: none"> • Cartographie des gisements • Scénarios de décentralisation • Modélisation de la collecte et du transport 	(Ville de Montréal, 2013d)
Unités d'évaluation foncière	<ul style="list-style-type: none"> • Cartographie des gisements • Scénarios de décentralisation 	(Ville de Montréal, 2017)
Annuaire statistique	<ul style="list-style-type: none"> • Cartographie des gisements 	(Montréal en statistiques, 2022)
Bilan massique des MR	<ul style="list-style-type: none"> • Cartographie des gisements 	(Ville de Montréal, 2013e)
Tronçons du réseau routier (géobase)	<ul style="list-style-type: none"> • Modélisation de la collecte et du transport 	(Ville de Montréal, 2013b)
Intersections du réseau router	<ul style="list-style-type: none"> • Modélisation de la collecte et du transport 	(Ville de Montréal, 2019)
Limites géographiques des arrondissements	<ul style="list-style-type: none"> • Scénarios de décentralisation 	(Ville de Montréal, 2013a)

La Figure 2.3 synthétise le système étudié par l'étude de cas. Elle s'isole du contexte de l'étude pour proposer des termes applicables à toutes les filières de la gestion des matières résiduelles.

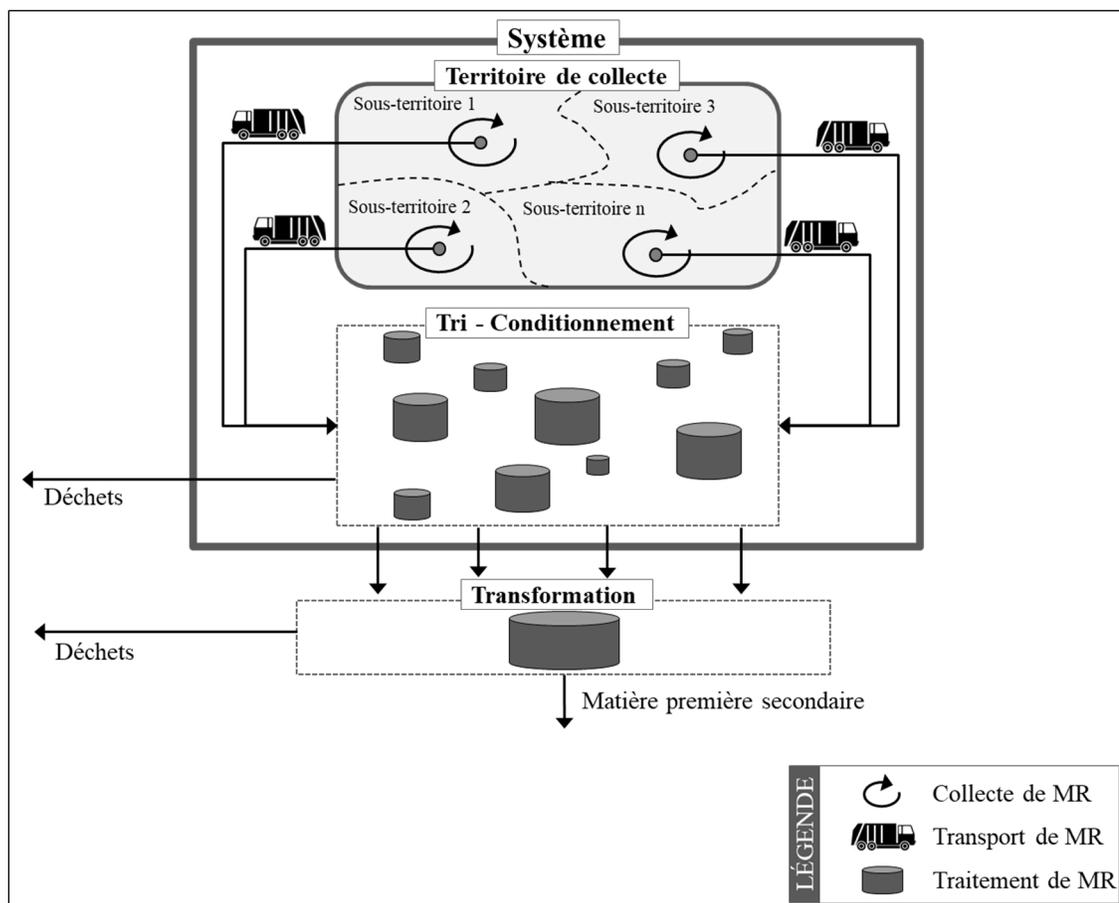


Figure 2.3 Définition des limites et des éléments du système de gestion des matières résiduelles étudié
Adapté de Tanguy et al. (2017)

La présentation préalable de l'étude de cas permet d'établir un portrait des données nécessaires. Le modèle reprend certaines particularités des données propres au contexte de l'étude.

2.2 Cartographie des gisements

L'estimation des quantités de MR générées s'accomplit par la conversion du bilan massique par arrondissement en une génération hebdomadaire par bâtiment. Cette estimation s'appuie sur les UEF et les bilans annuels de MR. Le Tableau 2.2 présente les propriétés, fournies par les rôles fonciers, nécessaires pour l'uniformisation des données.

Tableau 2.2 Propriétés des unités d'évaluations foncières pour la collecte de données

Propriété	Description	Référence
Catégorie de l'UEF	Catégorie qui peut prendre une des deux valeurs : régulier ou condominium	(Ville de Montréal, 2017)
Code d'utilisation des bien-fonds	Code de quatre chiffres qui décrit l'usage de l'UEF	(Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation, 2018)

Pour les condominiums, une catégorie de l'UEF présentée au Tableau 2.2, ils sont agrégés en un seul bâtiment à l'aide de leur centroïde. Cette étape permet d'obtenir une représentation uniforme des UEF. Le code d'utilisation est associé au type de bâtiment (Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation, 2018). Le Tableau 2.3 présente les codes retenus pour l'étude.

Tableau 2.3 Codes d'utilisation des bien-fonds considérés pour l'étude
Tiré de Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation (2018)

Code	Description	Code	Description
1000	Logement	1539	Autres résidences d'étudiants ou d'étudiantes
1100	Chalet ou maison de villégiature	1541	Maisons pour personnes retraitées non autonomes
1211	Maison mobile	1542	Orphelinat
1212	Roulotte résidentielle	1543	Maison pour personnes retraitées non autonomes
1512	Maison de chambre et pension	1549	Autres maisons pour personnes retraitées
1531	Maison de chambres pour personnes ayant une déficience intellectuelle	1990	Autres immeubles résidentiels
1532	Maison d'étudiants ou d'étudiantes		

De ces bâtiments collectés, le modèle assigne une population simulée à des logements de manière stochastique sous l'hypothèse simplificatrice que tous ces logements sont occupés.

L'Algorithme 2.1 présente la stratégie d'allocation des ménages à l'ensemble des bâtiments B d'un arrondissement.

Algorithme 2.1 Assignation des ménages dans les bâtiments

Procédure AssignationPopulation(C, B)

Pour chaque $b_i \in B$

Pour $k \leftarrow 1$ à $n_l(b)$

$\Sigma_l \leftarrow \sum_{i=1}^5 C_i$

$x \leftarrow \mathcal{U}_{\mathbb{N}}\{0, \Sigma_l\}$

$j \leftarrow 1$

Tant que $x > 0$

$x \leftarrow x - C_{i_r, j}$

Si $x \geq 0$

$j \leftarrow j + 1$

$p(b_i) \leftarrow j$

$C_i \leftarrow C_i - 1$

Pour un arrondissement donné, l'Algorithme 2.1 traite un tableau de distribution C où chaque entrée C_i du tableau fournit le nombre de ménages de taille i . Ce tableau est construit pour chaque arrondissement de la Ville de Montréal à l'aide de l'annuaire statistique (Montréal en statistiques, 2022). L'Algorithme 2.1 parcourt l'ensemble des logements de chaque bâtiment b_i afin d'assigner un ménage d'une taille aléatoire par logement sous la distribution uniforme \mathcal{U} . Le nombre restant de ménages influence la probabilité qu'un ménage donné soit retenu. Lorsqu'un ménage est assigné, l'algorithme enregistre l'allocation pour ainsi modifier les probabilités subséquentes.

L'équation (2.1) détermine le taux de génération d'un bâtiment en fonction de taux individuels. Les bilans de masses proposent ces taux individuels (Ville de Montréal, 2013e).

$$t_g(b) = \frac{t_{gmr}(a(b))}{52} \cdot p(b) \quad (2.1)$$

où :

- $t_g(b)$: Taux de génération d'un bâtiment (unité) (kg/semaine)
- $t_{gmr}(a(b))$: Taux de génération individuel d'un arrondissement (kg/personnes/an)
- $p(b)$: Population d'un bâtiment (personnes)

L'étude considère deux facteurs de variations : une variation aléatoire et une variation saisonnière. L'équation (2.2) détermine la masse de MR d'un bâtiment $m_r(b)$, en kilogrammes, avec la considération de ces facteurs.

$$m_r(b) = (t_g(b) \cdot 0,95 + \mathcal{U}_{\mathbb{R}}[-0,05; 0,05] \cdot t_g(b)) \cdot c_s \quad (2.2)$$

où :

- $m_r(b)$: Masse de MR d'un bâtiment pour une semaine donnée (kg)
- c_s : Coefficient saisonnier.

Comme exprimé par l'équation (2.2), la variation aléatoire influence de 5 % le taux de génération du bâtiment $t_g(b)$. En contrepartie, le mois de l'année influence le coefficient saisonnier c_s . Le Tableau 2.4 fournit les valeurs possibles du coefficient pour chacun des 12 mois.

Tableau 2.4 Coefficient saisonnier c_s selon le mois dans l'année
Adapté de Rhyner (1992)

Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
Taux	0,80	0,67	0,84	1,14	1,24	1,10

Mois	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Taux	1,04	1,34	1,07	1,16	0,97	0,84

Du Tableau 2.4, le coefficient du mois de novembre est retenu pour l'étude de cas puisque sa valeur est la plus proche d'une semaine moyenne. D'ailleurs, pour valider la génération, l'étude se concentre à analyser l'erreur entre les valeurs du modèle et celle des bilans de masses pour les cinq dernières années (Ville de Montréal, 2013e). La comparaison s'applique sur les données agrégées par arrondissement. La génération est considérée comme acceptable si l'erreur moyenne par arrondissement se situe entre -10 % et +10 %.

2.3 Modélisation du processus de collecte et de transport

L'algorithme mémétique (AMém) modélise le processus de collecte et de transport. Cet algorithme s'appuie sur un multigraphe $\Gamma = (V, E)$ qui représente le réseau routier du sous-territoire de collecte et établit des itinéraires. Cette section détaille ainsi la planification des itinéraires de collecte et de transport. Plus précisément, elle aborde la construction du multigraphe $\Gamma = (V, E)$, de l'implémentation de l'AMém et de sa validation.

2.3.1 Construction du multigraphe du réseau routier

Le réseau routier, avec les données de génération, est converti en un multigraphe $\Gamma = (V, E)$ orienté et pondéré. Les intersections routières représentent les nœuds V tandis que les tronçons représentent les arêtes E . Quatre propriétés sont ajoutées aux arêtes E , comme le montre le Tableau 2.5.

Tableau 2.5 Propriétés des arcs E du multigraphe $\Gamma = (V, E)$
Adapté de Lacomme et al. (2004)

Propriété	Symbole mathématique	Unité	Description
Demande	$m_r(e)$	Tonne	La masse de MR associé à l'arête.

Identifiant du tronçon routier	$i_r(e)$	S. O.	L'identifiant du tronçon du réseau routier, selon la source de données. Cette propriété permet la jonction du graphe au réseau routier.
Cout de collecte	$c_c(e)$	Seconde	Le temps nécessaire, en secondes, pour collecter les MR associés à l'arête.
Cout de passage	$c_t(e)$	Seconde	Le temps nécessaire, en secondes, pour traverser l'arête sans effectuer de la collecte.

Il est à noter que l'arête représente un tronçon r du réseau routier lorsqu'elle est à sens unique. Si elle est à double sens, deux arêtes, une pour chaque sens, sont alors définies pour représenter le tronçon r . Elles détiendront le même identifiant. L'équation (2.3) précise la demande d'une arête.

$$m_r(e) = \sum_{b_i \in b(e)} m_r(b_i) \quad (2.3)$$

où :

- $m_r(e)$: Demande d'une arête (tonne)
- $b(e)$: Bâtiments situés dans l'arête

Comme le montre l'équation (2.3), la demande repose sur la sommation des MR présentes dans les bâtiments associés au tronçon $m_r(b_i)$. Dans le cas des rues à double sens, une arête collecte les bâtiments du côté droit $b_d(r)$ et une autre collecte celle du côté gauche $b_g(r)$ pour en déduire la demande totale $m_r(e)$. Dans les rues à sens unique, les deux côtés sont agrégés. L'équation (2.4), quant à elle, précise que le cout de passage de l'arête.

$$c_t(e) = \frac{d(e)}{v_t(e)} \quad (2.4)$$

où :

- $c_t(e)$: Cout de passage d'une arête (seconde)

- $d(e)$: Distance de l'arête (kilomètre)
- $v_t(e)$: Vitesse de passage (km/h)

La catégorie du tronçon fixe la vitesse de passage. Le Tableau 2.6 présente les vitesses moyennes associées aux différentes catégories.

Tableau 2.6 Vitesses moyennes d'un camion selon le type de tronçon
Tiré de Tanguy et al. (2017)

Catégorie de tronçon	Vitesse moyenne
Autoroute	60 km/h
Avenue	50 km/h
Rue	30 km/h

L'équation (2.5) précise le cout de collecte. Cette équation et leurs paramètres sont adaptés de l'étude d'Everett et al., (1998).

$$c_c(e) = t_v(e) \cdot n_a(e) + \sum_{b_i \in b(e)} t_m(b_i) + 15 \quad (2.5)$$

où :

- $c_c(e)$: Cout de collecte de l'arête (seconde)
- $t_v(e)$: Temps de passage moyen entre les arrêts (seconde)
- $n_a(e)$: Nombre d'arrêts par tronçon
- $t_m(b_i)$: Temps de marche vers un bâtiment (seconde)

L'équation (2.5) précise que le temps de collecte d'un temps pour se déplacer entre les bâtiments et d'un temps pour récupérer les MRec. Également, l'équation considère que 15 secondes sont considérées à l'arrêt à chacune des intersections (Everett et al., 1998). L'équation (2.6) détaille le nombre d'arrêts par tronçon.

$$n_a(e) = \left\lceil \frac{|b(e)|}{f_a(e)} \right\rceil \quad (2.6)$$

où :

- $|b(e)|$: Nombre de bâtiments dans le tronçon
- $f_a(e)$: Fréquence d'arrêt dans un camion par tronçon

La fréquence d'arrêt d'un camion est fixée à un arrêt à chaque trois bâtiments pour une rue à double sens et à un arrêt à chaque six bâtiments pour une rue à sens unique (Everett et al., 1998). L'équation (2.7) détaille le temps de passage moyen entre les arrêts $t_v(e)$, en secondes.

$$t_v(e) = \frac{d_a(e)}{v_{\max} \cdot (1 - e^{-k \cdot d_a(e)}) \cdot c} \quad (2.7)$$

où :

- $d_a(e)$: Distance moyenne entre les arrêts d'un camion pour le tronçon (mètre)
- v_{\max} : Vitesse maximale moyenne que peut atteindre un véhicule entre deux arrêts (km/h)
- k : Coefficient de rapidité
- c : Facteur de conversion pour transformer les km/h en m/s

L'équation (2.7) fait intervenir trois constantes : la vitesse maximale moyenne v_{\max} que peut atteindre un véhicule entre deux arrêts, un coefficient de rapidité k et un facteur de conversion c . Une valeur plus élevée du coefficient de rapidité k suggère une accélération plus rapide vers la vitesse maximale moyenne v_{\max} (Everett et al., 1998). Les valeurs, pour les trois coefficients, sont respectivement de 24,3 km/h, de $1,7 \cdot 10^{-2} \text{ m}^{-1}$ et de 0,278. L'équation (2.8) précise la distance moyenne entre les arrêts d'un camion.

$$d_a(e) = \frac{d(e)}{n_a(e)} \quad (2.8)$$

L'équation (2.8) fait intervenir le nombre d'arrêts $n_a(e)$ calculé par l'équation (2.6). L'équation (2.9) précise le temps de marche.

$$t_m(b) = 0,86 \cdot d_m \cdot \left\lceil \frac{n_l(b)}{2} \right\rceil \quad (2.9)$$

où :

- d_m : Distance de marche (mètre)
- $n_l(b)$: Nombre de logements dans le bâtiment

La distance de marche de l'équation (2.9) est fixée à 1,7 m, qui correspond à la largeur standard d'un trottoir (Ville de Montréal, 2006). Cette équation suppose également que, pour chaque logement, un aller-retour est effectué entre le bâtiment et le camion de collecte. Elle suppose finalement que deux personnes collectent les MR pendant le processus. Cela constitue une adaptation de la formule d'Everett et al., (1998) à un contexte urbain.

Le multigraphe $\Gamma = (V, E)$ du réseau routier est complété par les arrondissements limitrophes pour éviter un graphe déconnecté dans le sous-territoire de collecte. Lorsqu'un tronçon vient d'un arrondissement limitrophe au sous-territoire, seul le cout de passage $c_t(e)$ est modélisé. Le tout permet l'exécution de la simulation de la collecte et le transport des MR dans le territoire. Cette simulation s'accomplit par l'AMém, détaillée dans la prochaine sous-section.

2.3.2 Collecte des matières résiduelles par algorithme mémétique

La collecte de MR s'accomplit par la résolution du problème du CARP sur le multigraphe de Montréal. L'AMém, plus particulièrement l'approche décrite par Lacomme et al., (2004), est retenu pour la résolution. Cet algorithme prend en entrée le multigraphe $\Gamma = (V, E)$ et

l'emplacement des centres de conditionnements. Il produit une liste d'itinéraires. La Figure 2.4 présente un sommaire de l'exécution de l'AMém.

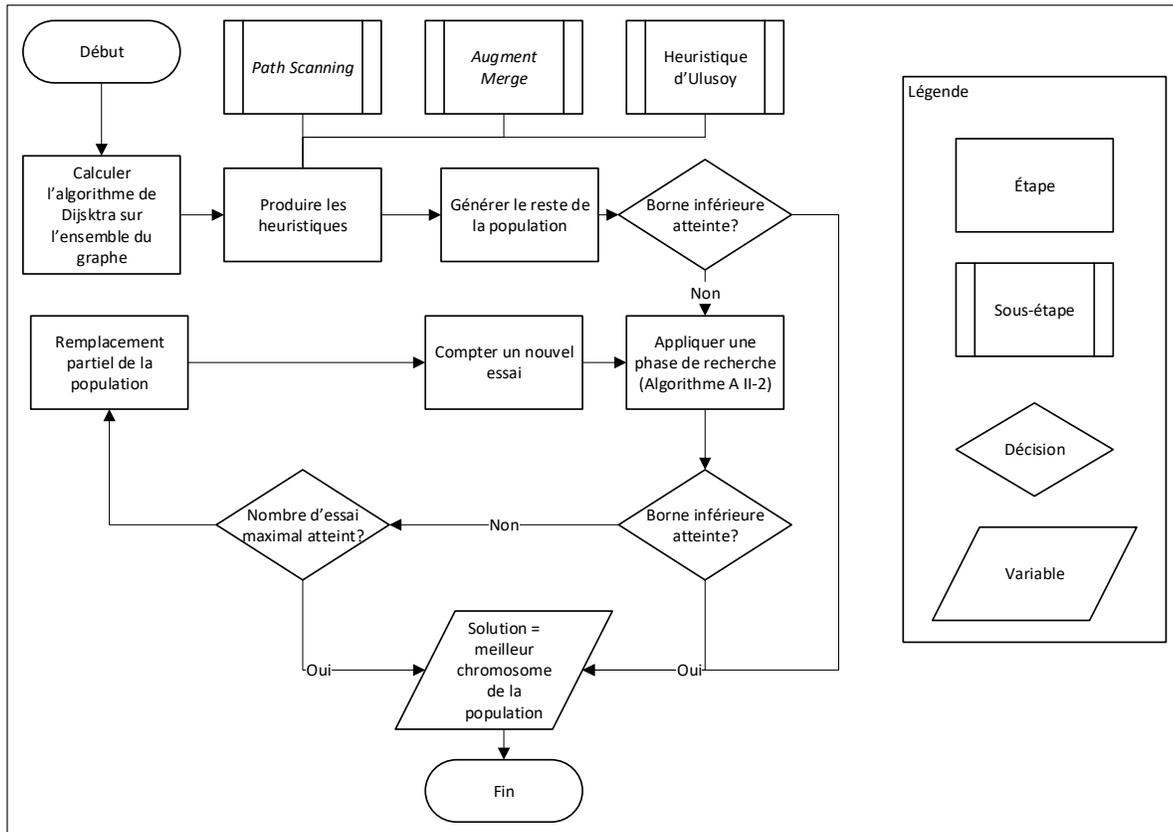


Figure 2.4 Sommaire de l'exécution de l'algorithme mémétique
Adapté de Lacomme et al. (2004)

Les composants nécessaires pour l'exécution de l'AMém, illustré par la Figure 2.4, sont présentés à l'annexe I. D'ailleurs, les heuristiques sont implémentées telles que décrites dans l'étude de Lacomme et al., (2004). L'AMém repose sur l'algorithme de Dijkstra (1959) pour connaître le plus court chemin entre chaque arête $e \in E$ du multigraphe $\Gamma = (V, E)$ sous la forme d'une matrice de distance D et une matrice de prédécesseurs P . L'AMém utilise la notion de chromosome s , qui représente une séquence de rues à collecter, divisées en itinéraires optimaux, et qui détient un cout total sous forme de fonction d'appréciation $F(s)$ (Lacomme et al., 2004). Puis, les heuristiques *Path-Scanning*, *Augment-Merge* et *Ulusoy* se joignent à la

population Π de n_c chromosomes. Les chromosomes restants ($n_c - 3$) sont générés aléatoirement tout en évitant la duplication de leur fonction d'appréciation $F(S)$. L'algorithme effectue des phases de recherches tant que la borne inférieure b_i ou le nombre maximal de phase de recherche n_{rd} n'est pas atteint. Un remplacement partiel de la population est appliqué entre ces phases. La borne inférieure b_i , plus particulièrement, est déterminé par la sommation du temps de collecte $c_c(e)$ des arêtes à collecter et du temps de passages $c_t(e)$ pour les autres arêtes.

2.3.3 Bancs d'essais pour la validation

Pour la validation de l'implémentation, l'AMém est comparé à l'implémentation de Lacomme et al. (2004) aux bancs d'essai de l'instance *gdb* (Belenguer & Benavent, 2003b). Cette instance est composée de 23 bancs d'essai qui contient entre onze et 55 arêtes (Belenguer & Benavent, 2003b). La comparaison porte sur les éléments suivants : la fonction d'évaluation $F(S)$ du chromosome retourné, le nombre de phases de recherches et le nombre de croisements. De plus, le temps d'exécution est utilisé pour référence afin d'optimiser l'implémentation de l'algorithme. Pour les bancs d'essai, les paramètres standards sont repris de l'étude de Lacomme et al. (2004). Le Tableau 2.7 explicite ces paramètres.

Tableau 2.7 Paramètres standards de l'algorithme mémétique
Adapté de Lacomme et al. (2004).

Paramètre	Description	Valeur
n_c	Taille de la population	30
p_{rl}	Probabilité de déclencher une recherche locale.	10 % à la première phase; 20 % aux phases subséquentes.
$c_{p_{max}}$	Nombre maximal de croisements pour une phase de recherche	20 000 à la première phase; 2000 aux phases subséquentes.
$c_{np_{max}}$	Nombre maximal de croisements non productifs pour une phase de recherche	6000 à la première phase; 2000 aux phases subséquentes.
n_{rp}	Nombre de chromosomes qui seront remplacés dans le remplacement partiel	8

n_{rd}	Nombre de phases de recherche	21
----------	-------------------------------	----

Les paramètres du Tableau 2.7 seront calibrés pour l'étude de cas. L'application du modèle sur un arrondissement permet cette calibration.

2.4 Évaluation de la performance des scénarios de décentralisation des centres de conditionnement des matières recyclables

Cette section traite de l'élaboration des scénarios et de l'évaluation de leur performance. D'abord, cette section présente la notion de scénario. Puis, cette section décrit l'approche pour déterminer l'emplacement des centres de conditionnement. Finalement, elle détaille les indicateurs de performances pour l'évaluation des scénarios.

2.4.1 Scénarios de décentralisation

L'élaboration des scénarios s'établit sur les 19 arrondissements de la Ville de Montréal. Un scénario définit le nombre de centre de conditionnement déployés sur le territoire. Le Tableau 2.8 énumère les scénarios envisagés pour l'étude.

Tableau 2.8 Découpage du territoire selon le degré de décentralisation

Numéro de scénario	Nombre de centres de conditionnement	Représentation des centres de conditionnements
1	1	Un centre pour toute la ville de Montréal
2	2	Un centre par dix arrondissements
3	4	Un centre par cinq arrondissements
4	7	Un centre par trois arrondissements
5	10	Un centre par deux arrondissements
6	19	Un centre par arrondissement

Dans le Tableau 2.8, le ratio du nombre d'arrondissements sur le nombre de centres de conditionnement déployés estime la représentation des centres de conditionnements. Or, cette représentation est fournie à titre indicatif seulement puisque le découpage du territoire

déterminera le nombre d'arrondissements par centres. En plus des scénarios du Tableau 2.8, un scénario qui représente le statu quo est ajouté. Ce dernier permet donc une base comparative pour tous les scénarios. Le centre de conditionnement de référence correspond au Complexe environnemental St-Michel (Ville de Montréal, 2020) tandis que le centre du premier scénario est calculé par le centre moyen pondéré.

2.4.2 Emplacement des centres de conditionnements par partitionnement du territoire

Pour l'approche de décentralisation, le découpage spectral groupe les arrondissements sur le territoire (Liu & Han, 2014; Strang, 2019) selon le nombre de centres de conditionnement k associé au scénario de décentralisation. Ce groupement considère les arrondissements et le réseau routier R . Ces ensembles sont reconvertis en un graphe $G = (V, E)$ non orienté et non pondéré. Un nœud $v \in V$ représente un arrondissement. Pour l'arête $e \in E$, si au moins un tronçon permet de relier deux arrondissements, ces derniers seront connectés par une arête e . L'équation (2.10) représente ainsi la matrice laplacienne, une propriété du graphe $G = (V, E)$ (Strang, 2019).

$$L = D - A \tag{2.10}$$

où :

- L : Matrice laplacienne
- D : Matrice de degrés du graphe
- A : Matrice d'adjacence du graphe

Comme le montre l'équation (2.10), la matrice laplacienne L se définit par la différence de la matrice de degrés D , une matrice diagonale avec le nombre de liens pour chaque nœud, et la matrice d'adjacence A , une matrice qui illustre les arêtes entre les nœuds (Strang, 2019). Le découpage spectral est calculé pour chacun des scénarios de l'étude de cas, c'est-à-dire pour chaque nombre possible de centres de conditionnement k . Lorsqu'il y a deux centres de

conditionnement ($k = 2$), le découpage sera appliqué selon les composants du vecteur propre de Fiedler (Strang, 2019). Lorsqu'il y a plus que deux centres ($k > 2$), les $k - 1$ vecteurs propres, tirés des valeurs propres λ positives et triées en ordre croissant, construisent des observations (Liu & Han, 2014). Celles-ci sont ensuite fournies à l'algorithme k-Moyennes++ (Arthur & Vassilvitskii, 2007) qui donne le groupement des arrondissements (Liu & Han, 2014). Le modèle prend l'implémentation de l'algorithme k-Moyennes++ disponible sur la librairie SciPy (Virtanen et al., 2020).

L'unité d'évaluation foncière (UEF) non résidentielle la plus proche du centre moyen pondéré d'un arrondissement ou d'un groupement d'arrondissements détermine l'emplacement d'un centre. Les équations (2.11) et (2.12) (ESRI, s.d.-b) déterminent les coordonnées géographiques, respectivement la latitude et la longitude, du centre moyen pondéré.

$$\bar{\lambda}_w = \frac{\sum_{b_i \in B} (n_l(b_i) \cdot \lambda(b_i))}{\sum_{b_i \in B} n_l(b_i)} \quad (2.11)$$

où :

- $\bar{\lambda}_w$: Latitude du centre moyen pondéré (degrés)
- $\lambda(b_i)$: Latitude du bâtiment (degrés)

$$\bar{\varphi}_w = \frac{\sum_{b_i \in B} (n_l(b_i) \cdot \varphi(b_i))}{\sum_{b_i \in B} n_l(b_i)} \quad (2.12)$$

où :

- $\bar{\varphi}_w$: Longitude du centre moyen pondéré (degrés)
- $\varphi(b_i)$: Longitude du bâtiment (degrés)

Les points considérés pour les coordonnées des centres moyens pondérés sont ceux des bâtiments B inclus dans un arrondissement ou dans un groupe d'arrondissement. Le champ de

pondération, quant à lui, est le nombre de logements $n_l(b)$. L'UEF considérée est également jointe à une arête $e \in E$ du multigraphe $\Gamma = (V, E)$ du réseau routier. La somme des MRec générées pour l'arrondissement ou le groupement d'arrondissements détermine la capacité du centre de conditionnement déployé. Cette somme est déterminée par le bilan de masse (Ville de Montréal, 2013e). Le Tableau 2.9 présente la catégorie du centre de conditionnement et sa capacité de traitement annuelle.

Tableau 2.9 Seuils de capacité de traitement de matières résiduelles selon la catégorie du centre de conditionnement

Adapté de Langlois-Blouin et al. (2021)

Catégorie du centre de conditionnement	Seuils de capacité de traitement (kt/an)
Petite	Inférieur à 20
Moyenne	Entre 20 et 40
Grande	Supérieur à 40

Les centres de conditionnements dans le sous-territoire de collecte ou dans les arrondissements limitrophes sont repris lors de la planification d'itinéraires. Également, le calcul d'indicateurs de performance prend en compte les capacités des centres de conditionnement.

2.4.3 Indicateurs de performances

Pour mesurer la performance d'un scénario, l'étude met sur place un indicateur de cout par masse de CO₂ évités. L'équation (2.13) présente l'indicateur.

$$i_{dd} = \frac{c_{dd} - c_{ref}}{e_{ref} - e_{dd}} \quad (2.13)$$

où :

- i_{dd} : Indicateur de cout par masse de CO₂ évités (\$/kg CO₂ évités)
- c_{dd} : Cout pour un scénario donné (\$)

- c_{ref} : Coûts du scénario de référence (\$)
- e_{dd} : Émissions de CO₂ pour un scénario donné (kilogramme)
- e_{ref} : Émissions de CO₂ du scénario de référence (kilogramme)

Pour calculer les coûts c_k et les émissions e_k de l'équation (2.13), quatre polluants interviennent dans l'étude : le CO₂, le CO, les particules fines (PM) et les hydrocarbonés (HC) (Zsigraiova et al., 2013). Les polluants sont calculés en fonction d'un véhicule dont la capacité maximale est de neuf tonnes. Leur poids correspond à la catégorie de véhicule lourd de 16 à 32 tonnes du MEET (Transport Research Laboratory et al., 1999). Les équations pour les indicateurs environnementaux sont adaptées de l'étude de Zsigraiova et al., (2013). Pour un polluant p donné, l'équation (2.14) décrit les émissions.

$$e_{p_k} = \sum_{r \in R_c} (e_{p_k,c}(r)) + e_{p_k,f} \quad (2.14)$$

où :

- e_{p_k} : Émissions d'un polluant (gramme)
- $e_{p_k,c}(r)$: Émissions d'un polluant à chaud (gramme)
- $e_{p_k,f}$: Émissions d'un polluant à froid (gramme)

De l'équation (2.14), l'émission à froid dépend du nombre d'itinéraires. L'équation (2.15) décrit l'émission à chaud $e_{p_k,c}(r)$ sur un tronçon.

$$e_{p_k,c}(r) = \epsilon_{p,c}(r) \cdot d(r) \quad (2.15)$$

où :

- $\epsilon_{p,c}(r)$: Facteur d'émission à chaud d'un polluant (g/km)

Le facteur d'émission de l'équation (2.15) dépend de la vitesse moyenne $v(r)$ sur le tronçon. Cette vitesse est déterminée par la longueur du tronçon $l(r)$ et le temps de collecte $c_c(r)$ s'il y a collecte ou le temps de passage $c_t(e)$ sinon. Le MEET a été validé sur des vitesses situées entre dix kilomètres par heure et 90 km/h (Transport Research Laboratory et al., 1999). Lorsque la vitesse moyenne se trouve entre ces valeurs, l'équation (2.16) précise le facteur d'émission $\epsilon_{p_{k,c}}(r)$.

$$\begin{aligned} \epsilon_{p_{k,c}}(r) = & \left(k_{1p} + a_p \cdot v(r) + b_p \cdot (v(r))^2 + c_p \cdot (v(r))^3 + \frac{d_p}{v(r)} \right. \\ & \left. + \frac{e_p}{(v(r))^2} + \frac{f_p}{(v(r))^3} \right) \\ & \cdot \left(\left(k_{2p} + r_p \cdot v(r) + s_p \cdot (v(r))^2 + t_p \cdot (v(r))^3 + \frac{u_p}{v(r)} \right. \right. \\ & \left. \left. - 1 \right) \cdot z(r) + 1 \right) \end{aligned} \quad (2.16)$$

où :

- $k_{1p}, a_p, b_p, c_p, d_p, e_p, f_p, k_{2p}, r_p, s_p, t_p, u_p$: Constantes associées à un polluant donné
- $v(r)$: Vitesse moyenne du véhicule à un tronçon (km/h)
- $z(r)$: Chargement relatif du véhicule à un tronçon

Dans l'équation (2.16), la capacité $z(r)$ est exprimé en pourcentage de sa capacité maximale. Cette capacité est située à neuf tonnes. Le Tableau 2.10 présente, pour chaque polluant considéré, la valeur de l'ensemble des paramètres.

Lorsque la vitesse moyenne est inférieure à 10 km/h, une fonction logarithmique est résolue dynamiquement. Cette dernière considère une asymptote verticale à $x = 0$ et qu'elle passe par les points limites du MEET avec l'équation (2.16).

Tableau 2.10 Valeurs des paramètres du facteur d'émission à chaud selon le type de polluant
Tiré de Transport Research Laboratory et al. (1999) et de Zsigraiova et al. (2013)

Paramètres						
Polluant	k_1	a	b	c	d	e
CO ₂	765	-7,04	0	0,000632	8334	0
CO	1,53	0	0	0	60,6	117
PM	0,184	0	0	$1,72 \times 10^{-7}$	15,2	0
HC	0,207	0	0	0	58,3	0
Polluant	f	k_2	r	s	t	u
CO ₂	0	1,27	0	0	0	-0,483
CO	0	1,17	0	0	0	-0,755
PM	0	1,24	0	0	0	-1,06
HC	0	1,01	$8,89 \times 10^{-4}$	0	$-2,54 \times 10^{-7}$	0

L'équation (2.17) traite plutôt des émissions à froid $e_{p_{k,f}}$ d'un tronçon. Elle remplit ainsi les équations nécessaires pour les émissions.

$$e_{p_{k,f}} = \epsilon_{p,f} n_d \quad (2.17)$$

où :

- $\epsilon_{p,f}$: Facteur d'émission à froid d'un polluant (g/démarrages)
- n_d : Nombre de démarrages

Pour l'équation (2.17), Le modèle suppose un démarrage à froid par itinéraire. Le Tableau 2.11 présente la valeur du paramètre $\epsilon_{p,f}$ pour les polluants considérés.

Tableau 2.11 Valeur du facteur d'émission à froid selon le type de polluant
Tiré de
Transport Research Laboratory et al. (1999)
et de Zsigraiova et al. (2013)

Polluant	Valeur du facteur d'émission à froid $\epsilon_{p,f}$
CO ₂	300
CO	6
PM	0,6
HC	2

L'indicateur économique c_{dd} de l'étude tient compte des équations (2.14) à (2.17). Les équations de l'indicateur économique c_{dd} sont adaptés des études de Tanguy et al., (2017) et de Zsigraiova et al., (2013). L'équation (2.18) présente l'indicateur économique c_{dd} dans son ensemble.

$$c_{dd} = c_{i_{dd}} + c_{o_{dd}} \quad (2.18)$$

où :

- $c_{i_{dd}}$: Cout d'investissement (\$)
- $c_{o_{dd}}$: Cout d'exploitation (\$)

Comme le montre l'équation (2.18), le cout d'investissement $c_{i_{dd}}$ et le cout d'exploitation $c_{o_{dd}}$ d'un scénario dd constitue l'indicateur économique c_{dd} (Tanguy et al., 2017). Chacun des couts sont exprimés en dollars. Le cout d'investissement $c_{i_{dd}}$ dépend de la catégorie du centre

de conditionnement. Le Tableau 2.12 présente le cout d'investissement annualisé selon la catégorie du centre de conditionnement.

Tableau 2.12 Cout d'investissement annualisé selon la catégorie du centre de conditionnement
Adapté de Langlois-Blouin et al. (2021)

Catégorie du centre de conditionnement	Cout d'investissement annualisé (k\$)
Petite	2230
Moyenne	1930
Grande	2650

Le modèle divise le cout en 52 semaines pour tous les scénarios. L'équation (2.19) décrit les composantes du cout d'exploitation c_{odd} .

$$c_{odd} = c_{ocdd} + c_{otdd} \quad (2.19)$$

où :

- c_{ocdd} : Cout associé à la collecte au transport (\$)
- c_{otdd} : Cout associé au conditionnement (\$)

L'équation (2.20) précise le cout de collecte c_{ocdd} . Elle est adaptée de l'étude de Tanguy et al. (2017).

$$c_{ocdd} = \sum_{r \in R_c} (c_d(r) \cdot \beta_{diesel} + C_{h_c} \cdot t(r)) \quad (2.20)$$

où :

- $c_d(r)$: Consommation de carburant au tronçon (L)

- β_{diesel} : Prix du carburant (\$/L)
- C_{hc} : Taux horaire des camions (\$/h)
- $t(r)$: Temps passé au tronçon (h)

Comme le montre l'équation (2.20), le carburant retenu pour l'étude est le diesel. Le taux horaire des camions c_{hc} est fixé à 83 \$/h. Le taux de camion comprend le salaire des employés de la collecte, les frais d'entretien et les assurances (Tanguy et al., 2017). De plus, le temps passé au tronçon correspond soit au temps de collecte ou temps de passage. Finalement, le prix du diesel est fixé à 1,17 \$/l (Tanguy et al., 2017). Cette équation doit être calculée pour tous les tronçons de l'itinéraire R_c , L'équation (2.21) présente la consommation du diesel $c_d(r)$ dans un tronçon.

$$c_e(r) = \frac{M_{\text{diesel}} * \left(\frac{e_{\text{CO}}(r)}{M_{\text{CO}}} + \frac{e_{\text{CO}_2}(r)}{M_{\text{CO}_2}} + \frac{e_{\text{HC}}(r)}{M_{\text{HC}}} + \frac{e_{\text{PM}}(r)}{M_{\text{PM}}} \right)}{\rho_{\text{diesel}}} \quad (2.21)$$

où :

- M_k : Masse molaire (polluants ou diesel) (g/mol)
- $e_k(r)$: Émission d'un polluant pour un tronçon (g)
- ρ_{diesel} : Masse volumique du diesel (kg/L)

L'équation (2.21) calcule la consommation de carburant d'un tronçon selon les polluants calculés aux équations (2.15) à (2.17). De plus, la masse volumique ρ du diesel est situé à 0,85 kg/l (Speight, 2011). Le Tableau 2.13 présente les masses molaires M utilisés par l'équation (2.21).

Tableau 2.13 Masse molaire des polluants
et du carburant considéré pour l'étude
Tiré de Transport Research Laboratory et al. (1999)

Composant chimique	Masse molaire (g/mol)
CO	28
CO ₂	44
HC	14
PM	12
Diesel	14

Le cout du tri $c_{ot_{dd}}$ vient compléter le cout d'exploitation. L'équation (2.22) présente ce cout.

$$c_{ot_{dd}} = c_{m_t} \cdot m_{mr} \quad (2.22)$$

où :

- c_{m_t} : Cout modularisé de conditionnement (\$/t)
- m_{mr} : Masse de MRec acheminé au centre de conditionnement (tonne)

Le cout modularisé dépend de la capacité du centre de conditionnement, comme montré par le Tableau 2.14. L'annexe II présente la démarche de modularisation de ces couts.

Tableau 2.14 Cout modularisé du conditionnement de
matières résiduelles selon la catégorie du
centre de conditionnement
Adapté
d'Éco Entreprises Québec & RECYC-QUÉBEC (2016, 2020)
et de Langlois-Blouin et al. (2021)

Catégorie du centre de conditionnement	Cout modularisé (\$/t)
Petite	37,55
Moyenne	40,26
Grande	40,65

Pour la validation des indicateurs de performance, la consommation de carburant est comparée aux valeurs rapportées dans la littérature (Jaunich et al., 2016; Nguyen & Wilson, 2010). Plus particulièrement, une valeur acceptable est située entre 0,25 et 1,00 L/km.

2.5 Détails d'implémentation

Cette section traite plutôt des détails d'implémentation du modèle, présenté tout au long du chapitre. L'ensemble de l'approche méthodologique est implémenté à l'aide de Python 3.8 (Python Software Foundation, 2019). La collecte de DSO, quant à elle, est implémentée avec JavaScript et Node.js à la version 12.18.3 (OpenJS Foundation & Node.js contributors, 2020). Lorsqu'applicables, les calculs préalables au modèle sont calculés sur QGIS (QGIS Development Team, 2021). De manière générale, les fonctionnalités implémentées sont accompagnées de tests automatisés pour valider leur fonctionnement et la régression lors de modifications sur le modèle. De plus, la génération des MR et la simulation de la collecte et du transport utilisent la librairie NumPy (Harris et al., 2020). Le découpage du territoire et le calcul des statistiques spatiales utilisent les librairies GeoPandas (Jordahl et al., 2022) et SciPy (Virtanen et al., 2020).

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

Ce chapitre présente les résultats générés par l'application de l'approche méthodologique sur l'étude de cas. La première section traite de la génération des MR dans les sept arrondissements de collecte (sous-territoire montréalais). La deuxième section traite de la planification des itinéraires de collecte. La troisième section traite des performances de la décentralisation.

3.1 Génération spatiale des matières résiduelles

Cette section analyse d'abord l'hypothèse simplificatrice que tous les logements sont occupés. Ensuite, elle propose des comparaisons pour la population et le bilan de masse. Tout au long de la section, les tableaux présentent des données pour le sous-territoire montréalais. L'annexe III reprend les tableaux présentés dans cette section avec tous les arrondissements de la Ville de Montréal.

L'hypothèse simplificatrice influence la représentation de la population puisque certains logements sont inoccupés. Le Tableau 3.1 détaille le taux d'inoccupation du sous-territoire montréalais. Le rapport entre le nombre de ménages et le nombre de logements selon les unités d'évaluations foncières (UEF) détermine ce taux.

Tableau 3.1 Taux d'inoccupation estimé
selon les arrondissements de collecte

Arrondissement	Taux d'inoccupation (%)
Anjou	6,84
Le Plateau-Mont-Royal	11,9
Outremont	10,9
Rosemont–La Petite-Patrie	6,16
Saint-Léonard	7,22
Ville-Marie	13,6
Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension	6,52
<hr/>	
Sous-territoire montréalais	9,10

En ignorant les taux d'inoccupation du Tableau 3.1, le calcul de la population augmente artificiellement cette dernière. Par conséquent, elle devient difficilement comparable avec une population de référence donnée par un annuaire statistique. Dans cette optique, la comparaison de la population s'applique sur une valeur ajustée. Ce dernier se base donc sur une attribution théorique de la population avec un taux d'occupation des logements de 100 %. Le Tableau 3.2 présente, pour chaque arrondissement de la collecte, la population générée par le modèle (simulation) selon l'approche d'assignation stochastique de la population. Le tableau présente la valeur de référence ajustée pour le modèle et la compare avec la valeur de simulation. Elle présente également la valeur de référence, tirée de l'annuaire statistique de Montréal (Montréal en statistiques, 2022).

Tableau 3.2 Comparaison de la population générée par le modèle et de la valeur témoin selon les arrondissements de collecte

Arrondissement	Population (individus)			Erreur (%) ⁴
	Référence ¹	Référence ajustée ²	Simulation ³	
Anjou	43 243	46 420	46 381	-0,0840
Le Plateau-Mont-Royal	105 813	120 118	119 878	-0,200
Outremont	24 629	27 630	27 494	-0,492
Rosemont–La Petite-Patrie	141 813	151 126	151 394	0,177
Saint-Léonard	79 495	85 685	85 256	-0,501
Ville-Marie	104 944	121 515	121 625	0,0908
Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension	145 090	155 212	156 004	0,510
Total	645 027	707 706	708 032	0,0461
¹ Valeur tirée de l'annuaire statistique de 2021 ² Valeur d'un recensement théorique à un taux d'occupation de 100 %. ³ Valeur générée stochastiquement (Algorithme 2.1) ⁴ Erreur calculée entre la simulation et la référence ajustée				

Pour chaque arrondissement, l'erreur est située entre -0,501 % et 0,510 %, une valeur en dessous du seuil d'acceptation de 10 %. Elle est attribuable à la génération stochastique de la population et à des erreurs de représentation. En effet, certaines imprécisions, dues à l'arrondissement des nombres dans les matrices de distribution D et dans le nombre moyen de personnes dans un ménage de 5 personnes et plus, entraîne des imprécisions. Ensuite, le Tableau 3.3 compare les MRec annuelles générées par le modèle (simulation) avec une valeur de référence ajustée. Cette valeur de référence ajustée s'obtient par la génération moyenne par personne entre 2014 et 2018, multiplié par la référence ajustée du Tableau 3.2.

Tableau 3.3 Comparaison des matières recyclables générés par le modèle et de la valeur de référence selon les arrondissements de collecte

Arrondissement	MRec générées (t/an)		Erreur (%)
	Référence ajustée	Simulation	
Anjou	3 110	3 110	0,00343
Le Plateau-Mont-Royal	11 341	11 333	-0,0750
Outremont	2 632	2 622	-0,383
Rosemont–La Petite-Patrie	14 265	14 306	0,284
Saint-Léonard	5 893	5 870	-0,396
Ville-Marie	12 727	12 749	0,176
Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension	9 453	9 511	0,612
Total	59 421	59 500	0,133

L'erreur de génération du Tableau 3.3 demeure plus faible, dans sa plage, que celle de la population pour le sous-territoire montréalais. En effet, les MRec rapportent entre -0,396 % et 0,612 %. En revanche, la plus haute erreur, tout comme l'erreur totale, est plus élevée pour les MRec que pour la population. Comme la formule de génération de MR dépend de la population, les résultats du Tableau 3.3 restent adéquats par rapport à la méthodologie. Le facteur aléatoire, situé à 5 % perturbe légèrement le modèle. Or, les valeurs sont situées à l'intérieur du seuil d'acceptation de 10 %.

3.2 Simulation de la collecte et du transport

Cette section rapporte les résultats en lien avec la modélisation de la collecte et du transport pour le sous-territoire montréalais. Elle présente d'abord le multigraphe du réseau routier généré par le modèle pour le sous-territoire de collecte. L'annexe IV présente ces données pour le territoire montréalais. Ensuite, elle détaille la calibration de l'AMém pour l'étude de cas. L'ensemble des ajustements nécessaires, tout comme la validation technique de l'AMém avec les bancs d'essai, est fourni à l'annexe V. Elle termine avec certaines caractéristiques des

itinéraires du scénario de référence. Les données pour l'ensemble des scénarios sont présentés à l'annexe VI.

3.2.1 Multigraphe du réseau routier

Le modèle agrège la génération des MR des bâtiments et les rapporte sur les tronçons dans l'objectif de modéliser le multigraphe $\Gamma = (V, E)$ qui représente le réseau routier. Pour assurer un graphe connecté dans le sous-territoire, les arrondissements limitrophes sont également inclus. Ces tronçons, plus particulièrement, rapportent un tonnage de MR et un cout de collecte nul. D'ailleurs, comme la complexité de l'algorithme mémétique (AMém) repose davantage sur le nombre d'arêtes à collecter (Lacomme et al., 2004), cette modification n'entraîne pas une plus faible performance théorique.

Le modèle génère 75 520 arêtes pour l'ensemble de la Ville de Montréal et 16 754 se retrouvent dans le sous-territoire montréalais, analysés dans cette sous-section. L'annexe IV propose une analyse pour la Ville de Montréal. Le Tableau 3.4 présente des statistiques sur la distribution des différentes propriétés du multigraphe $\Gamma = (V, E)$ pour le sous-territoire montréalais. En guise de rappel, le temps de passage est déterminé selon la longueur et la vitesse moyenne du tronçon. Le temps de collecte se calcule en fonction de la longueur du tronçon, du nombre de bâtiments et du nombre de logements. Les MRec hebdomadaires se calculent en fonction du nombre de logements qui se trouvent sur le tronçon.

Tableau 3.4 Statistiques de distribution sur le temps de passage, le temps de collecte et les matières recyclables du multigraphe $\Gamma = (V, E)$ du sous-territoire montréalais

Statistiques	Temps de passage (s)	Temps de collecte (s)	Matières recyclables hebdomadaires par tronçon (kg)
Moyenne	11,9	84,2	129
Médiane	8,74	57,9	55,1

Écart-type	10,7	73,9	228
Minimum	0,440	25,9	0,940
Maximum	209	2006	7 677

Au Tableau 3.4, le temps de collecte et les MRec hebdomadaires excluent les arêtes qui n'en détiennent pas. Au total, 7 807 arêtes sont ainsi exclues de ces deux colonnes. De plus, les MRec hebdomadaires sont basés sur le mois de novembre, dont le taux mensuel de variation se situe le plus proche de 1. Le total des MRec à collecter est ainsi de 1153 t.

Dans le multigraphe $\Gamma = (V, E)$, certains tronçons demeurent particulièrement longs, comme la rue Port-de-Montréal, dans l'arrondissement Ville-Marie, d'une longueur de 1,75 km (Ville de Montréal, 2013b). Le temps de collecte le plus long est observé sur la rue Prince-Arthur Ouest, sur Le Plateau-Mont-Royal. Malgré sa distance de 82,0 m, son temps de collecte est estimé à 2 006 s. Ceci s'explique par la présence de tours d'habitations qui se trouvent dans le tronçon. Cette tour s'élève à 33 étages et possède 1351 logements (Ville de Montréal, 2017). Ces tronçons, bien qu'aberrants, tendent ainsi à disperser la distribution des tronçons dans les différentes propriétés, comme le témoignent les statistiques du Tableau 3.4. En effet, la moyenne est supérieure à la médiane dans les trois propriétés. De plus, pour la demande, l'écart-type est 1,77 fois supérieur à la moyenne.

3.2.2 Paramètres d'exécution de l'algorithme mémétique sur le sous-territoire

L'AMém implémenté présente une complexité $O(|T|^3)$. Pour un nombre $|T|$ de rues à collecter, l'implémentation tend à effectuer $|T|^3$ traitements. Sur le plan de la calibration, 4 des 23 bancs d'essai présentent un cout total supérieur à l'implémentation de Lacomme et al., (2004) alors que 14 d'entre eux nécessitent un nombre de croisements plus élevé. Les erreurs se situent à 0,481 % pour le cout total, 58,6 % pour le nombre de croisements et 54,1 % pour le nombre de phases de recherche. Cette implémentation suggère que l'algorithme est en mesure de trouver les solutions optimales, mais qu'il nécessite plus de manipulations que

l'implémentation de Lacomme et al., (2004). L'annexe V détaille davantage les résultats de la calibration sur les bancs d'essai.

Pour la collecte dans le sous-territoire montréalais, l'AMém a été calibré sur un arrondissement afin d'optimiser la durée d'exécution. Le Tableau 3.5 présente les paramètres d'exécutions utilisés pour l'étude de cas. En guise de rappel, ces paramètres influencent le comportement de l'AMém et des critères d'arrêts de ces derniers. La justification de ces paramètres et l'impact sur les bancs d'essai, quant à eux, sont détaillés à l'annexe V.

Tableau 3.5 Paramètres de l'algorithme mémétique pour l'étude de cas

Paramètre	Valeur
n_c	30
p_{rl}	1,38 %
$c_{p_{max}}$	5266
$c_{np_{max}}$	1580
n_{rp}	S. O.
n_{rd}	1
b_i	2 091 537

Comme le montre le Tableau 3.5, le nombre de phases de recherche est limité à une seule phase. Conséquemment, ces paramètres excluent le remplacement partiel et rendent le paramètre de nombre de chromosomes remplacés n_{rp} caduque. Similairement, les nombres de croisements ne varient plus en fonction de la phase de recherche. En plus des valeurs présentées au Tableau 3.5, l'AMém implémenté possède certains ajustements supplémentaires. En outre, l'heuristique *Augment-Merge* a été retirée. De plus, les manœuvres considérées dans la recherche locale sont seulement celles qui impliquent, au plus, deux tronçons à collecter. Trois manœuvres, sur cinq, sont ainsi exclues. La recherche locale est également limitée à un nombre

maximal de mutations équivalent à 95 % du nombre total de tronçons à collecter |T|. L'impact de ces manœuvres augmente, sur les bancs d'essai, le cout total de 2,95 %.

En résumé, lorsqu'appliquées au sous-territoire montréalais avec le scénario de référence, les heuristiques permettent de trouver les solutions avec le meilleur temps de collecte. De plus, lors des exécutions, aucun croisement productif n'est compté dans le modèle. En d'autres mots, l'AMém semble incapable d'améliorer les heuristiques dans le sous-territoire. Le modèle tend donc à arrêter après les 1580 croisements non productifs. Ceci suggère que la probabilité d'améliorer la solution est plus faible que 0,0633 %. Face à ce constat, les solutions des heuristiques, couplées avec la stratégie de division, ont été considérées pour les itinéraires de l'étude de cas.

3.2.3 Itinéraires de collecte et de transport dans le sous-territoire

Cette présente sous-section présente les caractéristiques des itinéraires issus de l'AMém pour le scénario de référence. Elle analyse d'abord les itinéraires selon le temps de collecte et les MR collectés, comme retournés par l'algorithme mémétique. Puis, elle rapporte les itinéraires sur les distances parcourues dans le réseau routier montréalais. L'annexe VI présente les données pour l'ensemble des scénarios.

Le scénario de référence établit 137 itinéraires qui s'exécutent sur un total de 255 h. Ce total correspond à la somme du temps pour accomplir chacun des itinéraires et omet donc les éléments en lien avec une journée de travail. Le Tableau 3.6 présente des statistiques sur les itinéraires en fonction des résultats l'AMém, c'est-à-dire le temps par itinéraire, la quantité de MR collectée et le nombre de tronçons dans les itinéraires.

Tableau 3.6 Statistiques sur les itinéraires du scénario de référence

Statistiques	Temps (h)	MR collectés (t)	Nombre de tronçons par itinéraire	Nombre de tronçons à collecter par itinéraire
Moyenne	1,86	8,42	220	65,3
Médiane	1,74	8,77	207	56,0
Écart-type	0,574	0,862	87,9	38,4
Minimum	0,795	3,64	68	3
Maximum	4,10	8,99	657	200

Comme le montre le Tableau 3.6, au moins 50 % des itinéraires prennent plus de 1,74 heures à s’accomplir, ce qui suggère une inadéquation entre la méthode d’Everett et al., (1998) qui rapporte plutôt des itinéraires qui durent environ une heure. En revanche, la méthode Everett et al., (1998) s’applique sur un contexte territorial et temporel différent et omet le nombre de tronçons par itinéraires. Ainsi, cette méthode nécessiterait d’être appliquée au territoire montréalais. Nonobstant, comme l’erreur reste systématique entre les scénarios, cette dernière peut demeurer acceptable pour le cadre de l’étude.

D’un point de vue de la demande, les camions ont tendance à se remplir à presque pleine capacité. La médiane montre qu’au moins la moitié des itinéraires collecteraient 97,4 % de la capacité du camion. Cela étant, le minimum des MR collectés, de 3,64 t, demeure un comportement attendu des heuristiques. En effet, le dernier itinéraire de l’heuristique consiste à prendre les rues mises de côté lors de l’élaboration des itinéraires précédents (Lacomme et al., 2004). Conséquemment, ces tronçons peuvent plus difficilement s’approcher de la capacité de neuf tonnes. Finalement, d’un point de vue du nombre de tronçons, en moyenne, 29,7 % des tronçons sont utilisés pour la collecte alors que tous les autres tronçons servent au déplacement du camion. Cela demeure, néanmoins, une particularité du scénario de référence. En effet, comme le montre l’annexe VI, une augmentation du nombre de centres de conditionnement augmente la proportion des tronçons utilisés pour la collecte pour atteindre 44,2 % des tronçons dans le scénario décentralisé (un centre par arrondissement).

Bien que l'AMém représente un agencement d'itinéraires sous la forme d'arêtes, cette dernière demeure reliée au réseau routier par les identifiants du tronçon routier. Conséquemment, les données brutes de l'AMém sont reliées aux distances des tronçons pour fournir plus de statistiques. Le Tableau 3.7 présente ainsi les statistiques sur les distances en lien avec les itinéraires planifiés par l'AMém.

Tableau 3.7 Statistiques sur les distances parcourues
par itinéraires du scénario de référence

Statistiques	Distance absolues (km)			Distances relatives (%)	
	Total	Collecte	Transport	Collecte	Transport
Moyenne	23,1	8,21	14,9	37,0	63,0
Médiane	21,5	7,05	14,0	37,5	62,5
Écart-type	9,08	4,91	8,03	17,7	17,7
Minimum	8,59	0,327	3,34	1,91	23,4
Maximum	70,4	25,9	65,8	76,6	98,1

Au Tableau 3.7, le transport fait référence au déplacement d'un camion sans effectuer de la collecte. Cela correspond notamment au déplacement entre les rues à collecter et les centres de conditionnement ou entre les différentes rues à collecter d'un même itinéraire. Contrairement au nombre d'arêtes, la distance parcourue pour la collecte par itinéraire, en moyenne touche plutôt 37,0 % de la distance moyenne parcourue par itinéraire. Tout de même, cette proportion tend à augmenter selon le nombre de centre de conditionnement déployé pour atteindre une proportion moyenne de 54,9 % dans le scénario décentralisé. Les données nécessaires pour calculer ce pourcentage se trouvent à l'annexe VI. D'ailleurs, la distance minimale pour la collecte se situe à 1,91 km alors que le nombre minimal de tronçons est plutôt situé à 68. Cette

valeur suggère qu'un tronçon possède une grande quantité de MRec à collecter, qui peut correspondre à la présence d'une tour d'habitation. Dans cette même optique, la distance de déplacement élevée, comme souligné par le maximum, demeure attribuable au comportement des heuristiques implémentées. En effet, si le dernier itinéraire tend à collecter ce qui reste (Lacomme et al., 2004), la probabilité que cet itinéraire tende à parcourir de longues distances de déplacement devient donc élevée. L'itinéraire avec la distance maximale de déplacement est le dernier des itinéraires retournés par l'AMém. Ceci confirme donc le comportement de l'heuristique. De plus, l'itinéraire avec la plus longue distance de déplacement détient également la plus courte distance relative de collecte.

3.3 Performances de la décentralisation

Cette section analyse les résultats appliqués à l'étude de cas. La section présente d'abord l'emplacement des centres de conditionnement à l'aide du découpage spectral et du centre moyen pondéré. Ensuite, elle détaille davantage la performance des scénarios à l'aide de l'indicateur i_{dd} . Finalement, elle propose un diagnostic sur la décentralisation. Cette section revoit l'hypothèse associée à la problématique de recherche.

3.3.1 Emplacement des centres de conditionnement

Les résultats du découpage spectral se présentent sous quatre aspects : le graphe qui représente les arrondissements de Montréal, le partitionnement des arrondissements selon le scénario de décentralisation, l'application des statistiques spatiales et l'emplacement des centres de conditionnement. Cette sous-section présente ces aspects pour la Ville de Montréal. La Figure 3.1 illustre le graphe qui représente les agencements entre les arrondissements selon le réseau routier. En d'autres mots, une arête relie deux nœuds si un tronçon traverse la paire d'arrondissements. De plus, les étiquettes des nœuds sont basés sur l'acronyme de la liste des arrondissements de la Ville de Montréal (2013c).

Tableau 3.8 Grappes des arrondissements selon le degré de décentralisation

		Grappes			
Numéro de scénario		2	3	4	5
Nombre de centres de conditionnement		2	4	7	10*
Arrondissements	Ahuntsic-Cartierville	B	A	A	A
	Anjou	A	A	F	F
	Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce	A	C	F	J
	L’Île-Bizard–Sainte-Genève	B	D	D	F
	Lachine	B	B	B	B
	LaSalle	A	B	E	E
	Le Sud-Ouest	A	C	E	J
	Mercier–Hochelaga-Maisonneuve	A	A	F	F
	Montréal-Nord	B	A	A	A
	Outremont	A	C	F	H
	Le Plateau-Mont-Royal	A	C	F	I
	Pierrefonds-Roxboro	B	B	A	D
	Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles	A	A	G	G
	Rosemont–La Petite-Patrie	A	A	F	F
	Saint-Léonard	A	A	F	F
	Verdun	A	B	C	G
	Ville-Marie	A	C	F	H
Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension	B	A	A	A	
Saint-Laurent	B	B	A	D	
* Anomalie où l’arrondissement L’Île-Bizard–Sainte-Genève se trouve dans la même grappe que des arrondissements qui sont éloignés de celui-ci.					

En complément des scénarios présentés au Tableau 3.8, le premier et sixième scénario correspond, respectivement, à un centre pour toute la municipalité et à un centre par arrondissement. Les grappes sont considérées pour chaque scénario de décentralisation (chaque colonne du tableau). Comme l'illustre le Tableau 3.8, les scénarios montrent une variation du nombre d'arrondissements au sein d'une grappe. Un écart significatif est remarqué

par le quatrième scénario (sept centres déployés). Dans ce scénario, il y a au moins un arrondissement par grappe et au plus huit. De plus, pour le quatrième et cinquième scénario (dix centres déployés), certaines grappes contiennent seulement un arrondissement. Ceci illustre que le découpage spectral semble favoriser l'isolement des arrondissements les moins connectés. Dans le quatrième scénario, les arrondissements L'Île-Bizard–Sainte-Geneviève (degré un), Saint-Laurent (degré deux) et Verdun (degré deux) sont seuls dans leurs grappes. Ce phénomène est encore plus marqué dans le cinquième avec la présence de cinq grappes d'un arrondissement. Finalement, l'anomalie du cinquième scénario peut être attendue avec un nombre de grappes élevé pour le nombre d'arrondissements puisqu'il constitue une limite du découpage spectral (Strang, 2019). Puisque les centres de conditionnement sont déterminés manuellement, l'anomalie est corrigée en considérant une grappe supplémentaire qui contient uniquement cet arrondissement même si cette dernière influence le calcul du centre moyen pondéré.

La Figure 3.2 présente une cartographie des centres moyens pondérés pour les différents scénarios (1 à 6). Ces centres moyens pondérés correspondent aux coordonnées géographiques (latitude et longitude) moyennes des bâtiments situés dans une grappe et pondérés par le nombre de logements.

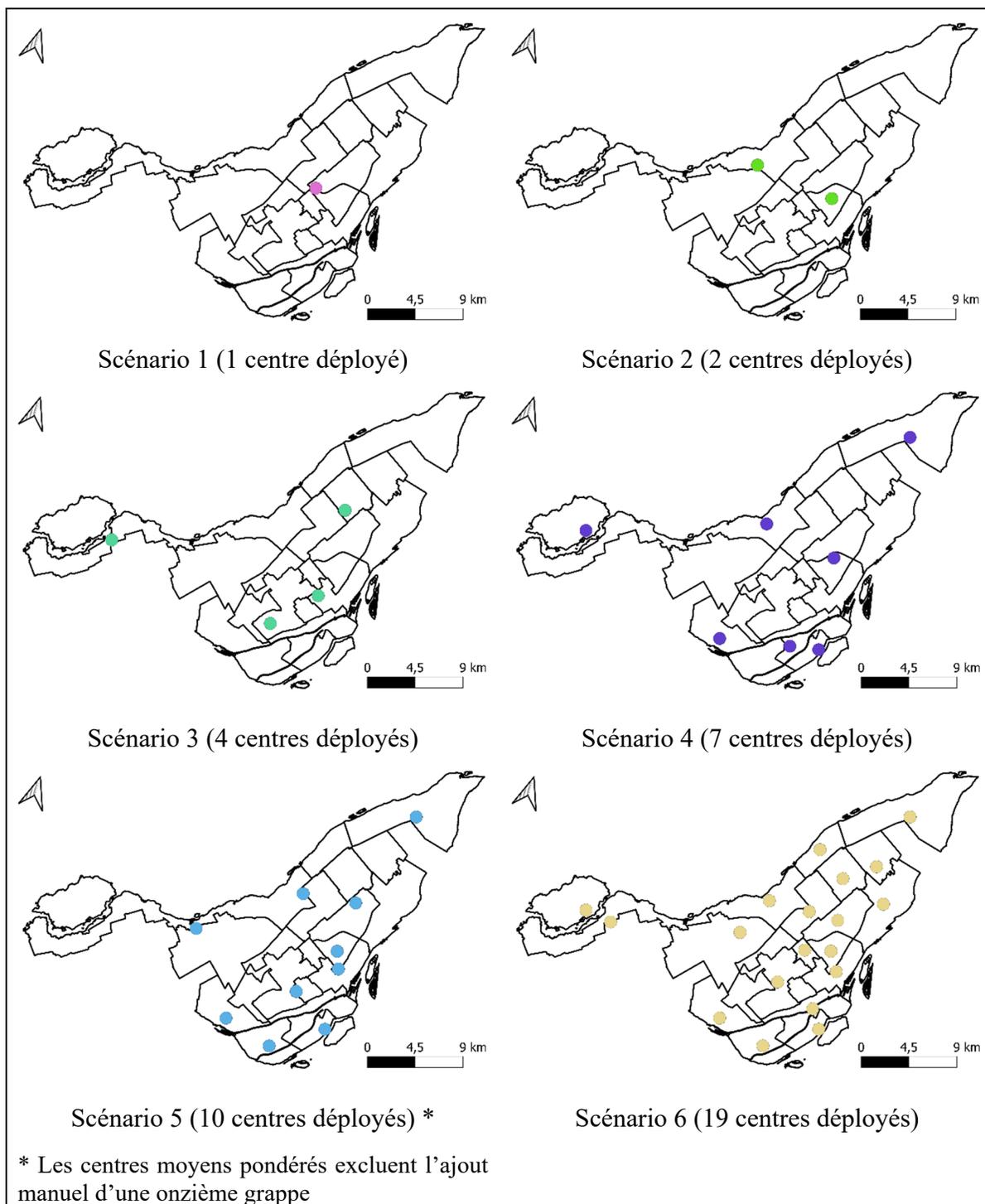


Figure 3.2 Centre moyen pondéré des grappes d'arrondissements

Dans la Figure 3.2, l'anomalie présente dans le 5^e scénario ne sort pas la grappe F sur le territoire. Ce dernier est situé dans l'arrondissement Rosemont–La Petite-Patrie. De plus, le centre moyen pondéré pour la grappe fictive de l'arrondissement L'Île-Bizard–Sainte-Geneviève est la même que celle du sixième scénario. Comme le montre la Figure 3.2, les centres moyens ont tendance à se concentrer sur certains arrondissements, comme Ahuntsic-Cartierville et Le Plateau-Mont-Royal qui possèdent, tous les deux, quatre centres moyens pondérés distincts. De plus, Le Plateau-Mont-Royal regroupe cinq centres de conditionnement puisque le cinquième et le sixième scénario partagent le même centre moyen pondéré. Également, dans le sixième scénario, le centre moyen pondéré de l'arrondissement Ville-Marie se trouve également dans l'arrondissement Le Plateau-Mont-Royal. Or, sur leurs graphes, les deux arrondissements possèdent un degré de trois et de quatre respectivement. D'ailleurs, deux des centres moyens se trouvent à l'extérieur de leur grappe d'arrondissement. Or, comme la méthode suggère un emplacement selon le territoire, ces derniers pourront se greffer à une UEF non résidentielle située dans le territoire. La disposition spatiale des logements des différentes grappes influence l'emplacement de ces deux centres. En effet, étant donné que ces arrondissements détiennent des polygones avec un creux, comme Pierrefonds-Roxboro, dont sa forme se rapproche à un croissant, le centre moyen pondéré peut tendre vers l'extérieur de l'arrondissement. Une situation similaire est observé sur le centre moyen pondéré de l'arrondissement de Saint-Laurent où le point tend vers l'est de l'arrondissement, où est concentrée la presque totalité des logements.

En ce qui a trait aux centres de conditionnements, 33 centres de conditionnements distincts sont déployés au travers de tous les scénarios. De ces 33 centres, six d'entre eux sont déployés dans deux ou trois scénarios différents. Ces centres de conditionnements ont une catégorie qui varie selon la grappe d'arrondissement et qui représente la capacité de tri annuelle. Dans cette optique, la Figure 3.3 illustre la proportion relative des centres de conditionnements selon les sept scénarios envisagés.

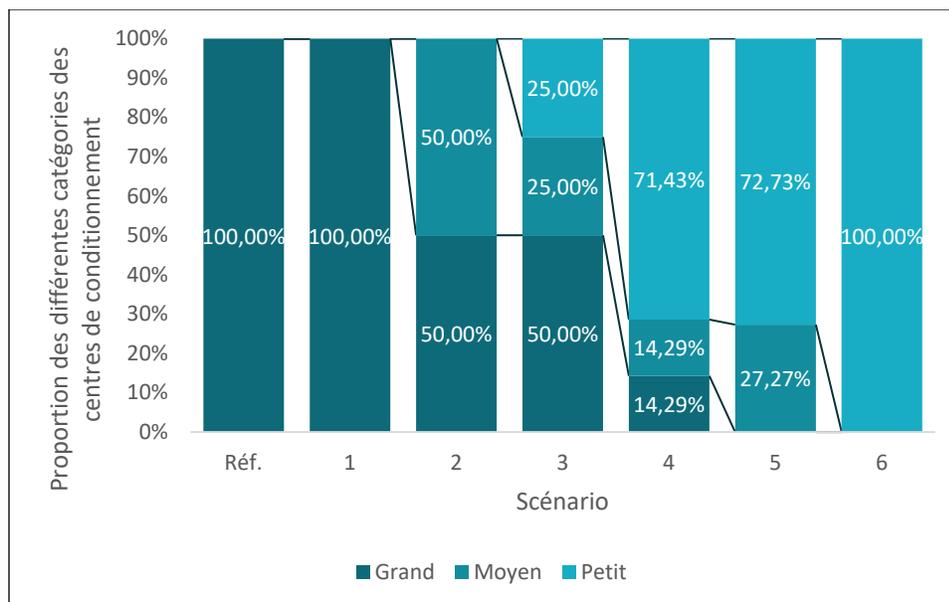


Figure 3.3 Proportion des différentes catégories de centres de conditionnement selon le scénario étudié

Comme le montre la Figure 3.3, la décentralisation permet, progressivement, de réduire le nombre de centre à grande capacité pour faciliter la mise en place de centres à petite capacité. Néanmoins, le scénario de référence et le premier scénario rapportent une évidence : si un seul centre est déployé sur le territoire, celui-ci est forcément de grande capacité (Kuznetsova et al., 2019). Le découpage tend à montrer un changement seulement à partir du deuxième scénario. L'ensemble des adresses pour ces centres sont offertes à l'annexe VIII.

3.3.2 Performances des scénarios de décentralisation

Cette sous-section propose de détailler les performances selon l'indicateur i_{dd} issue des scénarios. Elle aborde d'abord les données en lien avec le scénario de référence où le centre de conditionnement se trouve au Complexe Environnemental St-Michel (CESM). Ce scénario servira ensuite de base pour la comparaison des scénarios de décentralisation. L'annexe IX propose les données de performances pour les scénarios de décentralisation. Cette sous-section présente les résultats pour le sous-territoire de collecte.

Sommairement, les GES émis par le scénario de référence sont de 3,82 t pour une semaine de collecte. Les frais d'exploitation sont de 120 733 \$ alors que le cout d'investissement hebdomadaire est plutôt de 50 940 \$. Pour approfondir les indicateurs susmentionnés, le Tableau 3.9 présente les polluants et la consommation de carburant (diesel) pour la collecte, le transport et le transport post-tri. Les données se calculent avec l'application du MEET. Chaque donnée est rapportée en valeur absolue (abs.) et en valeur relative (%).

Tableau 3.9 Émissions des différents polluants et consommation de carburant pour le scénario de référence

Catégorie	Collecte		Transport		Transport post-tri	
	abs.	%	abs.	%	abs.	%
Émissions de CO ₂ (kg)	2200	57,7	1 598	41,9	16,1	0,422
Émissions de CO (kg)	12,8	66,1	6,48	33,5	0,0704	0,364
Émissions de PM (kg)	2,44	66,3	1,23	33,4	0,0126	0,341
Émissions de HC (kg)	8,43	72,7	3,13	27,0	0,0290	0,250
Consommation de carburant (L)	845	58,0	607	41,6	6,13	0,420

Dans le Tableau 3.9, le transport post-tri réfère au transport des matières triées vers le recycleur. Comme le montre le Tableau 3.9, la collecte émet la majorité des polluants. Cela s'explique notamment par la consommation de carburant qui demeure plus élevée à de faibles vitesses. En effet, pour la collecte, le camion roule en moyenne à 4,96 km/h. En revanche, dans une situation réelle, le camion effectuerait des arrêts intermittents. De plus, la faible émission de polluants du transport post-tri s'explique aussi par la faible distance à parcourir, située à 18,5 km. Il est à noter que deux camions doivent partir du centre de tri (CDT) puisque les PET cumulés atteignent 17,3 t et que la capacité maximale demeure neuf tonnes. À titre de comparaison, la collecte et le transport des MRec parcourent 3170 km.

La consommation de carburant du scénario est de 0,458 L/km alors que les études rapportent entre 0,25 et 1,00 L/km (Jaunich et al., 2016; Nguyen & Wilson, 2010). Plus particulièrement,

elle est plus faible que 8 des 20 observations de Franco González et al., (2021). La consommation est donc considéré comme acceptable.

Sur le plan des couts, ce dernier se divise en quatre éléments : la collecte et le transport des MRec, le tri, le transport post-tri et les couts d'investissements. Le cout de collecte, de transport et de transport post-tri dépend du temps de collecte et de la distance parcourue. Le cout de tri dépend des MRec à trier. Le cout d'investissement est rapporté en une dépense hebdomadaire. Le Tableau 3.10 rapporte ces différents couts pour le scénario de référence.

Tableau 3.10 Couts associés au scénario de référence

Catégorie de couts	Montant hebdomadaire (\$)	Montant annuel (k\$)	Part relative (%)
Collecte et transport	22 883	1190	19,0
Tri	46 874	2440	38,8
Transport post-tri	36,3	1,89	0,0301
Investissement	50 940	2650	42,2
Total	120 733	6280	100

Dans le Tableau 3.10, le montant annuel est obtenu en multipliant le montant hebdomadaire par 52. Ce dernier omet donc la variation mensuelle des MRec. Comme pour les polluants, la plus faible distance suggère également un plus faible temps pour accomplir le trajet, comme le montre le cout de transport post-tri du Tableau 3.10, qui représente 0,030 % du cout total. D'ailleurs, les fonctions de couts de déplacement (collecte, transport et transport post-tri), linéaires, sont directement influencées par le temps nécessaire alors que la fonction de cout du tri, linéaire également, est directement influencée par les MRec à collecter. De plus, le cout le plus élevé se situe dans l'investissement. Il représente 42,2 % des dépenses, environ 3,4 % de plus que la deuxième plus grande dépense, le tri.

Pour la décentralisation, la performance est évaluée selon l'indicateur i_{da} qui correspond aux couts nécessaires pour éviter l'émission de GES. Le Tableau 3.11 propose les valeurs de

l'indicateur selon le scénario pour le sous-territoire. En guise de rappel, un centre est inclus dans le sous-territoire de collecte si ce dernier se trouve dans les arrondissements du sous-territoire ou dans les arrondissements adjacents. Les données nécessaires pour calculer l'indicateur sont présentés à l'annexe IX.

Tableau 3.11 Indicateur des coûts associés aux économies de CO₂ par scénario

Numéro de scénario	Nombre de centre déployés	Indicateur i_{dd} (\$/kg CO ₂ évités)
1	1	-2,59
2	2	160
3	3	201
4	4	392
5	6	295
6	13	646

Au Tableau 3.11, la valeur négative de l'indicateur i_{dd} signifie que la diminution des émissions de CO₂ entraîne une économie des coûts. Cette économie est attribuable au scénario. En effet, vu qu'un seul centre est déployé, le coût d'investissement et celui d'exploitation demeurent le même entre le premier scénario et celui de référence. En revanche, étant donné que ce CDT est rapproché de la génération de MR, le coût de collecte est réduit de 444 \$ alors que celui de transport post-tri augmente de 12,7 \$. De plus, le premier scénario entraîne une diminution de 166 kg de CO₂. Dans cette optique, l'hypothèse comme quoi un scénario permet une forte diminution de CO₂ à moindre coût est rejetée. Cette hypothèse supposait que la réduction des émissions entraînerait inévitablement une augmentation des coûts. Hormis ce scénario, le deuxième scénario est celui qui réduit les émissions de CO₂ à moindre coût. Ceci semble notamment attribuable aux plus faibles coûts d'investissement puisque moins de centres sont déployés. La Figure 3.4 illustre les parts des coûts pour la collecte et le transport, le conditionnement et l'investissement, des composantes de la portion économique de l'indicateur i_{dd} .

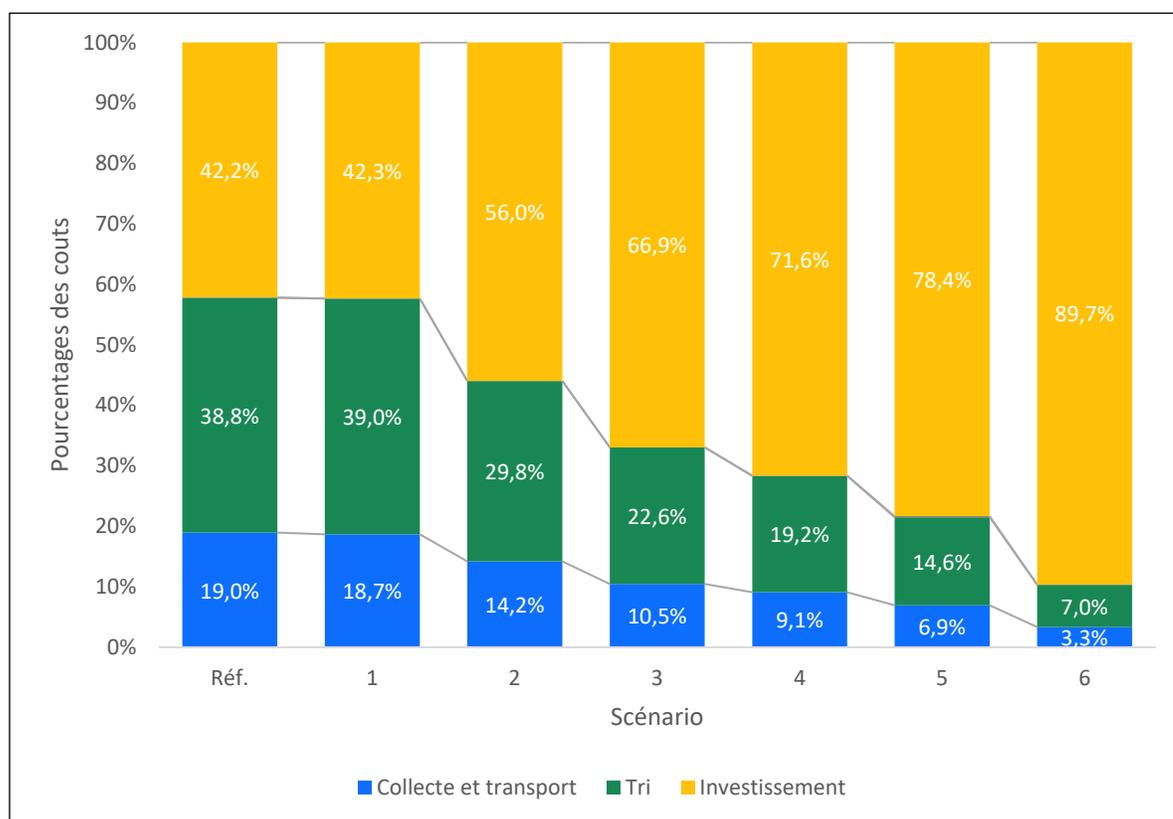


Figure 3.4 Part des coûts selon le scénario de décentralisation

Dans la Figure 3.4, les pourcentages des coûts de transport post-tri sont omis puisque ces derniers restent généralement faibles (entre 0,023 % et 0,17 %). Comme le montre la Figure 3.4, l'investissement reste le principal coût associé aux scénarios et prend une place plus prépondérante au fur et à mesure de la décentralisation. D'ailleurs, entre les scénarios, le coût de transport post-tri tend à augmenter selon le scénario pour atteindre 14,1 fois le coût du scénario de référence dans le cinquième scénario (six CDT déployés dans le sous-territoire). Également, le coût de transport varie entre les scénarios. En outre, dans le cinquième scénario, beaucoup des MR sont acheminées à des centres éloignés du recycleur. Les écarts par rapport au scénario de référence demeurent en dessous de 100 % pour les coûts de collecte et transport et de conditionnement et les émissions de CO₂. La Figure 3.5 illustre les économies pour ces catégories par rapport au scénario de référence.

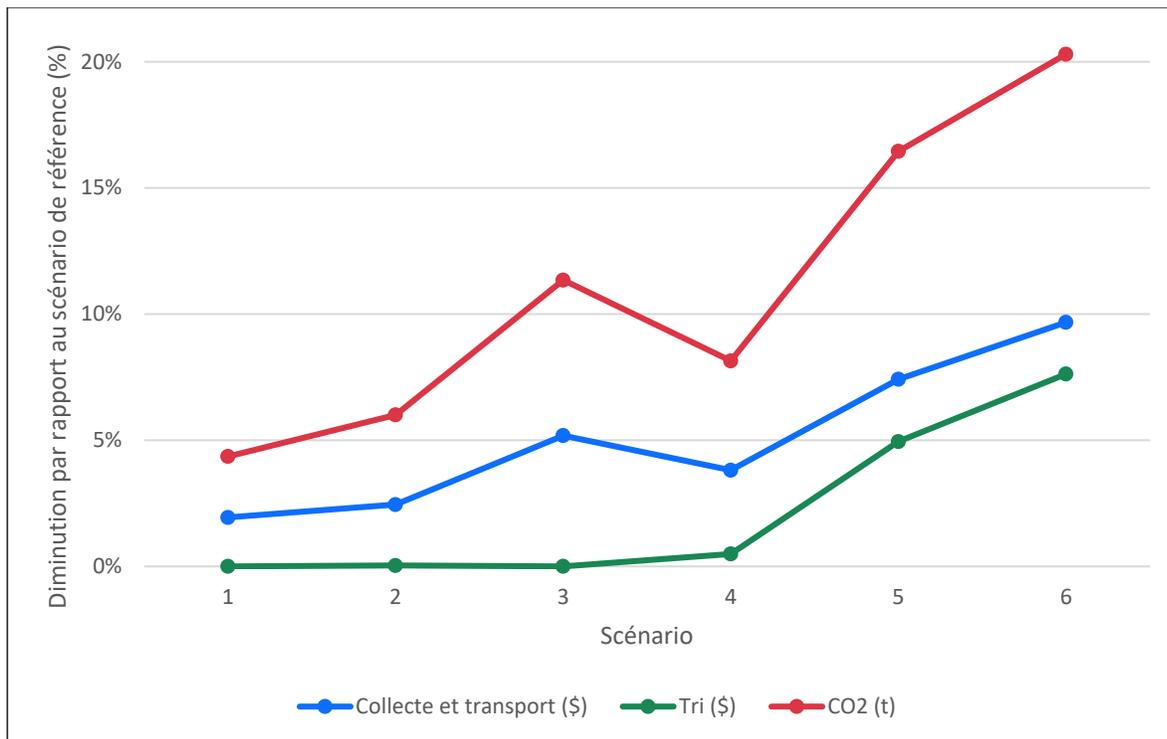


Figure 3.5 Diminution relative des coûts et des émissions de GES selon le scénario par rapport au scénario de référence

Comme le montre la Figure 3.5, les variations les plus marquées se trouvent dans les GES. Ceci est attribuable notamment aux changements d'itinéraires. Ces itinéraires diminuent le temps total de 4,43 à 22,2 h et la distance totale à parcourir de 216 à 1 219 km, selon le scénario. Ces deux éléments influencent les émissions de GES puisqu'une vitesse moyenne plus rapide entraîne une émission plus faible selon la méthodologie. La même conclusion peut être tirée pour la distance. D'ailleurs, toujours selon la méthodologie, une diminution du carburant consommée et du temps abaisse, à leur tour, le coût nécessaire pour la collecte et le transport. Dans les deux cas, cette évolution n'est pas constante. Notamment, le quatrième scénario (quatre CDT déployés dans le sous-territoire) marque une diminution des économies relatives par rapport au troisième scénario (trois CDT déployés dans le sous-territoire). Sur le plan des CDT, en revanche, l'amélioration semble plus constante. Ceci est attribuable, entre autres, à la notion de rejets. En effet, les plus petits centres ont tendance à produire moins de rejets (Langlois-Blouin et al., 2021). Ainsi, le coût de tri modularisé demeure plus faible pour les

plus petits centres. De plus, ces petits centres apparaissent à partir du troisième scénario et augmentent en nombre à partir du quatrième, une tendance illustrée, par l'accentuation de la courbe au quatrième scénario.

3.3.3 Diagnostic sur l'approche décentralisée

Les résultats des indicateurs i_{dd} concluent qu'un CDT centralisé, mais proche de la génération des MR semblerait plus intéressant en raison des forts couts d'investissement que nécessite la décentralisation. En revanche, certaines conditions limites pourraient favoriser l'approche décentralisée. Ces éléments portent au-delà de l'indicateur i_{dd} .

L'investissement se réalise sur un temps donné. Une fois terminé, les montants d'investissements deviennent nuls et tous les scénarios permettraient, selon l'approche méthodologique, une réduction simultanée des couts et des émissions de CO₂. Pour les couts d'exploitation, cette diminution serait de 0,618 à 8,04 % pour une semaine. Sous cet angle, le scénario décentralisé deviendrait donc le plus intéressant.

La décentralisation vient modifier la configuration des itinéraires de collecte. Le scénario de référence nécessite 137 itinéraires alors que les scénarios de décentralisation nécessitent entre 139 et 157. Comme il y a plus d'itinéraires, le temps moyen par itinéraire selon les scénarios évolue ainsi de 1,48 à 1,79 h alors qu'il est situé à 1,86 h dans le scénario de référence. Sur le nombre de tronçons à collecter, le scénario de référence suggère qu'entre 65 et 66 tronçons sont collectés par itinéraires alors que ce nombre varie entre 57 et 64 dans les scénarios de décentralisation. La distance totale par itinéraire diminue également. En fait, la distance de déplacement (entre les rues à collecter ou le CDT) diminue. La distance totale parcourue pour les 157 itinéraires du scénario décentralisé est de 2050 km. La reconfiguration des itinéraires reste attribuable à la stratégie de division de l'AMém. Cette stratégie de division, en guise de rappel, énumère tous les itinéraires possibles pour une séquence de rue à collecter sous la forme d'un graphe auxiliaire. Les heuristiques élaborent cette séquence. L'algorithme de Dijkstra

(1959), appliqué de la première rue de la séquence à la dernière dans le graphe auxiliaire, permet de retourner un agencement d'itinéraires optimaux (Lacomme et al., 2004). Ainsi, la stratégie de division de l'itinéraire semble favoriser l'élaboration d'itinéraires plus courts. Or, cette stratégie peut augmenter le nombre de camions selon l'ordonnancement des itinéraires dans la journée. Les courts itinéraires diminuent aussi le MRec collecté par itinéraires. Dans le scénario de référence, ce nombre est de 8,42 t par itinéraires, en moyenne, alors qu'il diminue vers 7,34 t vers le scénario le plus décentralisé. De plus, la décentralisation réduit davantage la distance à parcourir pour collecter une tonne, comme l'illustre la Figure 3.6.

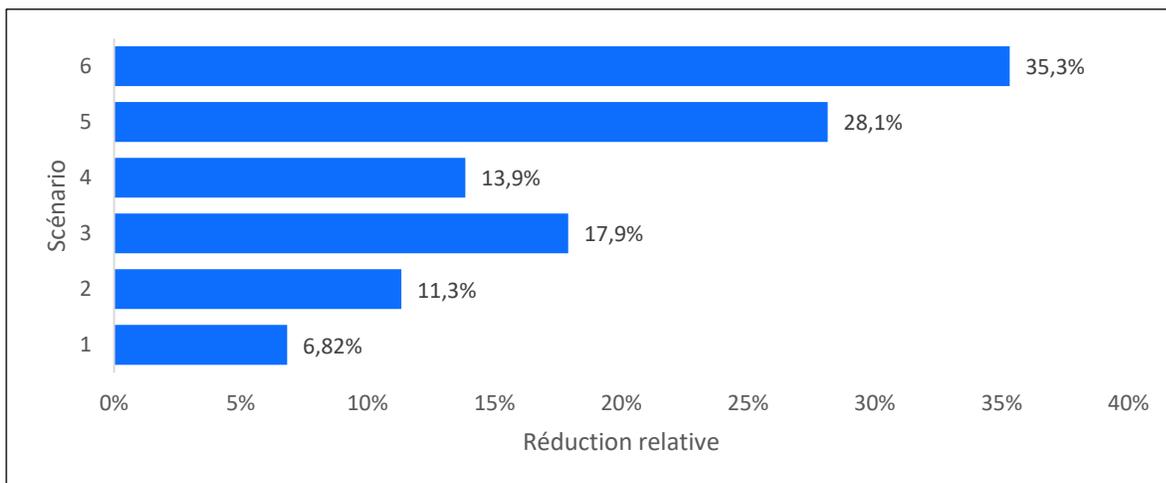


Figure 3.6 Réduction relative des kilométrages pour collecter une tonne et de la vitesse moyenne du camion

Lorsque sont considérés les kilométrages et les vitesses moyennes, le scénario décentralisé (numéro 6) demeure celui qui diminue le plus la distance nécessaire pour collecter une tonne. Ces résultats sont attendus puisque la distance et le temps total pour accomplir la collecte ont également diminué. Elles confirment aussi les conclusions de Kuznetsova et al., (2019) que la décentralisation réduit les distances. Somme toute, la réduction du kilométrage et du tonnage par itinéraire suggère que la décentralisation semble plus flexible face à une éventuelle augmentation de la demande bien que, dans l'immédiat, le nombre d'itinéraires tend à augmenter. D'ailleurs, la non-linéarité de la diminution de la performance s'observe également

avec les distances nécessaires pour collecter une tonne. Le quatrième scénario (4 centres déployés dans le sous-territoire) détient ici une particularité d'agencement. En effet, un seul centre se trouve dans le sous-territoire et les trois autres se situent dans les arrondissements limitrophes. Les itinéraires tendent ainsi à aboutir vers le seul centre dans le sous-territoire. Pour illustrer cette tendance, la Figure 3.7 présente la destination de chaque itinéraire. Une ligne droite est tracée entre la dernière rue collectée et le centre moyen pondéré du CDT de destination.

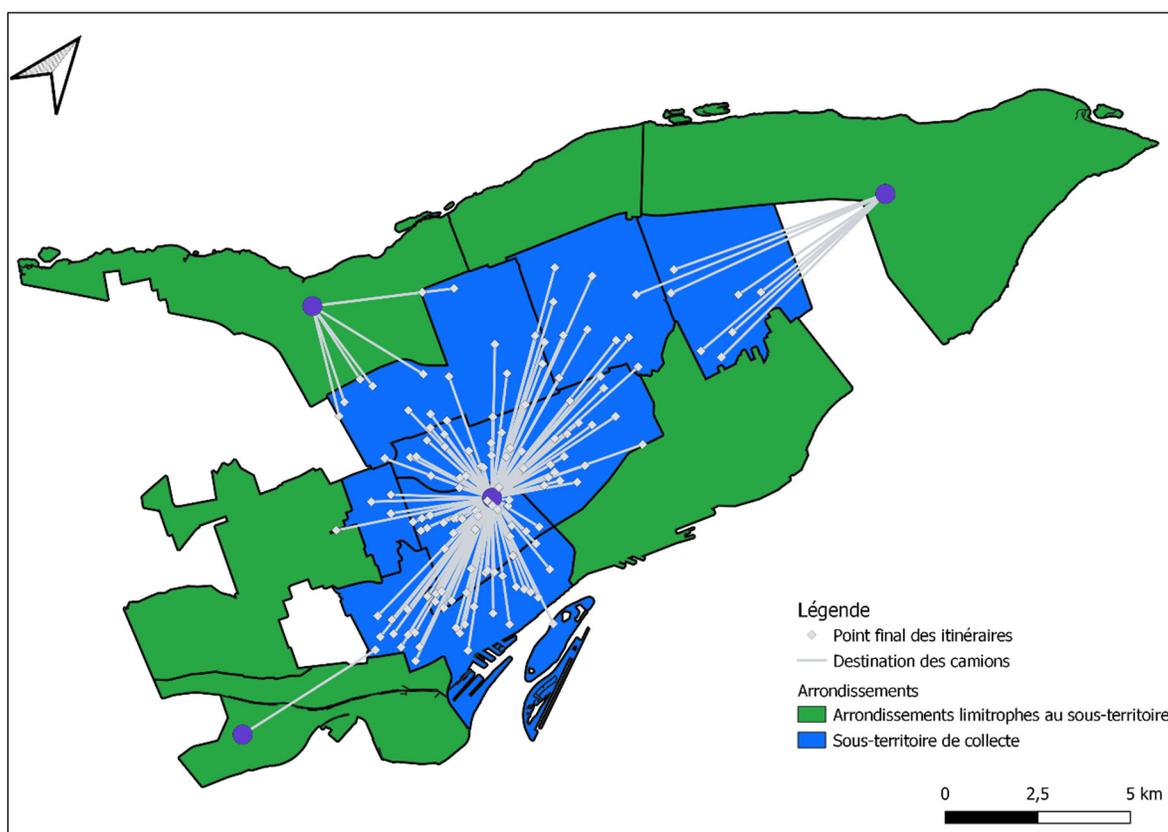


Figure 3.7 Acheminement des camions après la dernière rue collectée pour le quatrième scénario (quatre centres déployés dans le sous-territoire)

Comme le montre la Figure 3.7, la plupart des itinéraires se dirigent vers le CDT situé dans le sous-territoire. Plus précisément, 88,6 % des itinéraires se dirigent vers ce CDT. Ainsi, pour le sous-territoire, cela ressemble davantage à un contexte centralisé contrairement aux troisième

et quatrième scénarios. Cela se confirme dans la distance pour collecter une tonne où la diminution de 13,8 % semble davantage apparter au deuxième scénario (deux centres déployés dans le sous-territoire), dont la diminution de cette distance se situe à 11,3 %. Dans ce scénario, également, seulement un des deux centres se trouve dans le sous-territoire de collecte. Cela tend ainsi à augmenter les distances de transport. Dans le quatrième scénario, la distance de transport augmente de 129 km par rapport au scénario précédent. Ceci est attribuable au choix du sous-territoire de collecte. En effet, les itinéraires pourraient être mieux répartis si tout le territoire montréalais est envisagé pour la collecte. De la même manière, les résultats pourraient être ainsi plus linéaire.

La décentralisation distribue les 1 153 t collectées sur les différents centres. Similairement, elle distribue les 17,3 t de PET dans ces centres pour une semaine donnée. En revanche, cette distribution, pour le sous-territoire, n'est pas uniforme. Par exemple, dans le quatrième scénario (quatre centres déployés dans le sous-territoire), 15,7 t sont acheminées vers un centre alors que le reste est réparti entre deux autres centres. Par conséquent, cette concentration de ressource ajoute un nouvel itinéraire de transport post-tri. Cet ajout s'observe aussi dans le scénario de référence et le scénario centralisé (numéro 1). La concentration des MR vers un centre, selon leur disposition spatiale, peut donc poser un frein opérationnel à la décentralisation. En contrepartie, elle permet d'entreposer plus longtemps les matières triées ou d'utiliser de plus petits camions pour effectuer le transport post-tri. Hormis la concentration des MRec, la distribution sur le territoire vient également augmenter les distances d'itinéraires post-tri puisque plus d'itinéraires doivent être envisagés. En revanche, cette augmentation demeure négligeable face à la diminution de la distance du processus de collecte et transport.

Somme toute, la décentralisation engendre de plus forts couts d'investissement et ces couts dépassent les économies d'opération de la décentralisation. En contrepartie, d'autres avantages peuvent être observés, dont la réduction totale du temps, des distances et l'augmentation de la flexibilité des itinéraires et des centres.

CHAPITRE 4

DISCUSSION

Au-delà des résultats obtenus, ce chapitre revoit, analyse et critique l'ensemble des éléments du projet de recherche. Le chapitre présente notamment des limitations de l'étude et propose des perspectives de recherche pour les pallier. La première section discute des conditions supplémentaires nécessaires pour appliquer l'approche de la décentralisation dans le territoire étudié. La deuxième section révisé l'algorithme mémétique (AMém) et son potentiel. Finalement, la troisième section offre des perspectives d'applications au-delà de l'étude de cas.

4.1 Opérationnalisation de la démarche

La présente section aborde la mise en exploitation de la démarche dans le contexte territorial de l'étude. En effet, bien que la présente recherche étudie l'impact de la décentralisation, celle-ci s'appuie, méthodologiquement, sur des modèles pour estimer les performances environnementales et économiques associées à un changement d'approche sur les infrastructures. Plus précisément, cette section propose de revoir l'intégration au contexte territorial actuel, d'aborder la mutualisation de l'infrastructure de traitement de MR et de présenter la dimension temporelle.

4.1.1 Intégration au contexte territorial actuel

L'étude actuelle considère une approche où des centres de tri (CDT) seraient remplacés selon l'implémentation des scénarios. Ainsi, à Montréal, selon le scénario suggéré (nombre de CDT) et la méthodologie développée par l'étude, le Complexe environnemental de Saint-Michel (CESM) pourrait être remplacé par un ou plusieurs centres relocalisés ailleurs sur le territoire montréalais. De plus, la méthode omet les contraintes territoriales et légales en lien avec la mise en place des CDT. Cela soulève l'observation que l'emplacement du centre demeure un élément important pour les performances environnementales et économiques. Néanmoins, ces

CDT déployés pourraient rencontrer des difficultés en vue de leur intégration au territoire et en ce qui concerne le cadre réglementaire (Office de la consultation publique de Montréal, 2012).

Sur un plan environnemental, « le bâtiment le plus écoresponsable est celui qui est déjà bâti » (Elefante, 2007) (traduction libre). Ainsi, l'implantation de centres décentralisés doit plutôt considérer une approche d'intégration au territoire et au milieu bâti existant. Par exemple, la méthodologie proposée par Kuznetsova et al. (2019) consiste à déployer un centre de traitement pour répondre à une demande changeante. En revanche, comme le montrent les résultats, le choix du prochain centre à intégrer doit demeurer judicieux sinon, les retombées pourraient être limitées. La méthode de cette étude, bien que conçue pour une approche avant-après, peut tout de même s'adapter à une optique d'intégration puisque des scénarios d'intégration peuvent être envisagés et appliqués au modèle.

Dans le cadre de cette étude, les CDT déployés pouvaient remplacer des écoles, des lieux culturels ou des lieux de cultes. Le Tableau 4.1 présente les codes d'utilisation des biens-fonds des unités d'évaluations foncières (UEF) (Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation, 2018; Ville de Montréal, 2017) associés aux 33 centres de conditionnement déployés pour tous les scénarios. Il est à noter que seul le chiffre du millier est considéré pour la catégorisation.

Tableau 4.1 Pourcentage des centres de conditionnement déployés
selon la catégorie du bien-fonds
Adapté de Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation (2018) et de Ville de
Montréal (2017)

Code d'utilisation	Catégorie du bien-fonds	Nombre de centres de conditionnement déployés
1000	Résidentielle	1 (3,03 %)
2000 et 3000	Industries manufacturières	2 (6,06%)
4000	Transports, communications et services publics	3 (9,09 %)
5000	Commerciale	9 (27,3 %)
6000	Service	10 (30,3 %)
7000	Culturelle, récréative et de loisirs	4 (12,1 %)
9000	Immeubles non exploités et étendues d'eau	5 (15,2 %)

Le Tableau 4.1 montre que la seule UEF résidentielle remplacée est un espace de rangement pour condominiums. Néanmoins, un CDT remplacerait un immeuble résidentiel en construction. Similairement, une seule UEF remplacée touche un espace de stationnement. De plus, les CDT sont catégorisés comme un bâtiment de service (Ville de Montréal, 2017). Or, plusieurs CDT déployés remplacent d'autres bâtiments de service, comme trois centres hospitaliers, trois lieux de culte et deux écoles. Seulement quatre centres visent des espaces non aménagés. Ces observations rappellent l'importance de considérer le territoire bâti actuel. En revanche, cette considération pourrait limiter les territoires disponibles. Notamment, seulement 10,1 % des terrains industriels sont vacants (Communauté métropolitaine de Montréal, 2012). À son tour, cette limitation sur les territoires disponibles peut diminuer la performance environnementale et économique. Le modèle peut considérer des scénarios qui excluent certaines catégories du bien-fonds et ainsi étudier ces impacts sur la performance. En effet, ces exclusions peuvent être modélisées en différents scénarios.

En plus des contraintes d'intégration, le choix des emplacements soulève la considération de l'acceptabilité sociale. À titre d'exemple, la Ville de Montréal a considéré plusieurs sites pour

la mise en place de centres de traitement de matières organiques (MO) : le CESM, la carrière Demix, un centre à LaSalle et un autre à la ville de Dorval (Office de la consultation publique de Montréal, 2012). Le rapport Centres de traitements de MO de l'Office de la consultation publique de Montréal (2012) rapporte que l'opinion publique demeurerait en accord sur le bien-fondé du projet et sur l'initiative de la Ville de Montréal. En revanche, l'opinion publique refusait l'emplacement du CESM et de la carrière Demix puisque ces deux arrondissements accueillent déjà des centres de traitement de MR, qu'elles s'inscrivent mal dans les efforts d'urbanisme actuel, comme le développement du futur parc Frédéric-Back, et qu'elles peuvent augmenter la présence de véhicules lourds, toujours selon le rapport. Le rapport conclut, notamment, que le parc Frédéric-Back doit être préservé si un centre de compostage est intégré au CESM. L'opinion publique aura fait reculer la Ville de Montréal pour envisager l'arrondissement Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles en 2014 (Office de la consultation publique de Montréal, 2015). Cet exemple demeure propre au territoire de l'étude de cas, mais suggère tout de même une limite de l'étude à exclure les facteurs sociaux. En outre, des consultations publiques ont soulevé l'exposition à la population à des nuisances, comme le bruit ou les odeurs (Office de la consultation publique de Montréal, 2012). Dans cette optique, le modèle développé dans cette étude pourrait considérer des indicateurs supplémentaires dans son évaluation de la performance, comme ceux soulevés par l'opinion publique.

En dehors du choix de la localisation, la conception du centre de tri (CDT) et de conditionnement peut également faciliter son intégration dans le contexte territorial actuel avec les contraintes réglementaires et sociales susmentionnées. Entre autres, le centre de valorisation énergétique de Tridel, situé à Lausanne en Suisse, est partiellement sous terrain (Tridel SA, s.d.). Pour limiter les impacts, les MR sont acheminées en train et arrivent au centre par voie souterraine (Tridel SA, s.d.), ce qui limite l'exposition à la population.

Le modèle actuel permet d'appréhender des risques financiers liés à l'approche décentralisée. En revanche, l'étude simplifie ou adapte certains paramètres en lien avec les coûts. Dans une

optique d'intégration au territoire, le Tableau 4.2 révisé ces paramètres et offre des perspectives pour améliorer la fiabilité des données économiques.

Tableau 4.2 Pistes d'intégrations des adaptations réalisées par l'étude

Simplifications ou adaptations de l'étude	Pistes d'intégrations
Modélisation du temps de collecte selon le contexte territorial de The Village, en Oklahoma	Reprendre la méthodologie d'Everett et al. (1998) et l'appliquer au contexte territorial avec la considération des multilogements et des saisons
Considération de la variation saisonnière selon le contexte territorial du comté de Brown	Reprendre la méthode de Rhyner (1992) au contexte territorial
Omission du taux d'inoccupation	Considérer le taux d'inoccupation selon les configurations des logements et modéliser l'inoccupation dans une perspective spatiale.
Considération que tout ménage peut occuper tout logement	Pondérer la probabilité d'occupation selon les configurations des logements et les répartitions des ménages selon ces configurations
Omission des règlements relatifs au travail	Considérer les règlements sur les heures supplémentaires et diviser la collecte en secteurs de collecte

Pour la considération que tout ménage peut occuper tout logement du Tableau 4.2, la configuration des logements fait référence à la superficie et au nombre de pièces, ce qui pourrait permettre d'accueillir des ménages de différentes tailles. Cependant, ces données et celles de la répartition des ménages selon les configurations des logements, au même titre que les MR, demeurent des données agrégées. Les données plus précises s'obtiennent à un coût plus élevé (Madden et al., 2021). Toutefois, elle permettrait une meilleure assignation des ménages, un réarrangement des itinéraires et une augmentation de la précision du modèle. L'omission des règlements relatifs au travail réfère à la notion d'heures supplémentaires. En effet, au Québec, au-delà de 40 heures de travail par semaine, le salaire est bonifié de 50 % (Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail, s.d.).

Sur un plan opérationnel, la décentralisation amène à revoir la taille du camion ou la source d'énergie. Selon le MEET, un camion de plus petite taille aurait tendance à émettre moins d'émissions de polluants (Transport Research Laboratory et al., 1999). Dans le modèle, le changement de la taille du camion vient modifier les itinéraires de collecte et nécessite donc de les replanifier en plus de changer les paramètres de l'évaluation de la performance. Le changement de la source d'énergie viendrait également modifier les paramètres de l'évaluation de la performance.

4.1.2 Mutualisation de l'infrastructure

Cette sous-section se concentre sur les solutions pour lever le frein lié à l'investissement pour l'infrastructure, la dépense de l'approche décentralisée, selon les résultats. Or, la méthode de l'étude repose sur la notion d'infrastructure dédiée. En effet, la seule fonction du CDT consiste à trier les MRec. Ceci omet la notion de mutualisation bien qu'elle demeure applicable.

La mutualisation permet de diminuer la consommation des ressources, comme les matières premières et l'énergie, et le besoin en infrastructure (Morency, Verreault, & Demers, 2015; Sun & Ertz, 2021). Pour l'infrastructure bâtie, la mutualisation s'observe par le partage d'espace et d'équipement (Doré, 2021). Ainsi, dans une perspective de gestion des MR (GMR), un CDT mutualisé peut accueillir un centre de traitement pour une autre filière, comme envisagé pour la valorisation des MO dans le CESM (Office de la consultation publique de Montréal, 2012). Dans cette optique, une étude similaire à celle du présent mémoire pourrait s'intéresser à l'intégration des MO et des ordures ménagères à l'approche décentralisée. Cette étude peut ainsi intégrer une notion de mutualisation. Cela pourrait alors diminuer le nombre de centres totaux à déployer sur le territoire pour une collecte à plusieurs voies. De plus, le modèle développé par l'étude permet déjà de fournir certains résultats pour les MRec, l'une des trois filières municipales. Cette étude peut donc se concentrer davantage sur les MO et les ordures ménagères.

4.1.3 Dimension temporelle associée à la gestion des matières résiduelles

La génération de MR évolue au fil des années (Kaza et al., 2018; RECYC-QUÉBEC, 2020; Ville de Montréal, 2013e). Globalement, dans un contexte centralisé, si la quantité de MR générée par personne venait à augmenter, davantage d'itinéraires doivent être mis en place. Le kilométrage par itinéraires peut ainsi diminuer. En revanche, le kilométrage total augmente. Ceci est notamment dû aux distances totales de transports entre les rues à collecter et les CDT qui augmentent avec le nombre d'itinéraires. De plus, avec une augmentation de la demande, la capacité des CDT pourrait aussi être dépassée et de nouveaux centres doivent être considérés (Ma et al., 2021).

Les résultats du modèle suggèrent, pour rappel, qu'un itinéraire tend à collecter entre 7,34 et 8,42 t de MR, selon le scénario étudié. De plus, en moyenne, entre 1,78 et 2,75 km sont parcourus pour collecter une tonne de MR. La décentralisation peut fournir une certaine flexibilité face à l'augmentation des MR (Kuznetsova et al., 2019) à Montréal, dont l'effet immédiat s'observe par une augmentation du nombre d'itinéraires. En effet, 20 itinéraires sont ajoutés aux scénarios décentralisés par rapport au scénario de référence. Or, le kilométrage total diminue puisque les distances de transports, notamment entre les CDT et les rues à collecter, diminuent avec des centres plus proches de la génération. Ainsi, cette amélioration de la flexibilité permettrait que davantage de MR totales soient générées pour un territoire donné avant de considérer le changement d'itinéraires et une potentielle augmentation du kilométrage total. En revanche, si cette évolution demeure uniforme sur le territoire, les séquences de rues à collecter devraient demeurer similaires au fil du temps. La décroissance des MR générées peut aussi survenir. En effet, entre 2018 et 2019, à Montréal, le taux de génération de MRec par personne a augmenté de 4,12 %. Il s'agit de la seule augmentation de MRec entre 2014 et 2018 (Ville de Montréal, 2013e).

Pour intégrer les différentes tendances, le modèle peut être mis à profit pour étudier l'impact de l'évolution temporelle des MR dans la planification des itinéraires. En effet, comme le taux de génération par individu et par arrondissement demeure un paramètre du modèle, celui-ci peut être modifié pour analyser l'impact d'un potentiel changement dans la demande sur les itinéraires et plus largement, sur la performance de la décentralisation.

En résumé, la mise en exploitation de la démarche nécessite d'approfondir l'intégration au contexte territorial actuel. Cette intégration nécessite de perfectionner les paramètres de l'étude et d'approfondir les indicateurs de performance. Cela soulève aussi la perspective de mutualisation pour réduire les coûts d'investissement. Également, bien qu'une intégration spatiale doit être considérée, une dimension temporelle doit tout de même être ajoutée pour évaluer une solution adéquate à un contexte changeant.

4.2 Potentiels de l'algorithme mémétique

Lorsqu'appliqués à l'étude de cas, les heuristiques, *Path-Scanning* (Golden et al., 1983) et Ulusoy (1985) trouvent les solutions finales. Cela suggère que hormis la procédure de division de l'itinéraire, les composants de l'AM ajoutent une faible valeur à la recherche de la meilleure solution. Ainsi, l'approche heuristique paraît plus appropriée. Cela confirme le comportement de l'heuristique, qui consiste à rapidement trouver une solution robuste (Laguna & Martí, 2013). Bien que le temps de collecte serve de variable indépendante pour presque tous les indicateurs, ces derniers peuvent être modélisés dans le graphe pour élaborer une solution multiobjective.

En guise de rappel, l'approche multiobjective consiste à trouver des solutions qui minimisent ou maximisent simultanément des objectifs distincts sous la forme d'un meilleur compromis (Steuer, 2013). Cette approche permet de considérer des critères contradictoires, observable dans la prise de décision sur la GMR (Kuznetsova et al., 2019). L'approche multiobjective permet de considérer la planification de la GMR dans son ensemble (Abdallah, Hamdan, &

Shabib, 2021; Ahani et al., 2019; Mavrotas, Gakis, Skoulaxinou, Katsouros, & Georgopoulou, 2015; Pourreza Movahed et al., 2020). Les approches favorisées touchent la modélisation mathématique (Abdallah et al., 2021; Mavrotas et al., 2015; Russo & Verda, 2020) ou les métaheuristiques (Ahani et al., 2019; Pourreza Movahed et al., 2020; Xue & Cao, 2016), ce qui écarte les heuristiques. Ainsi, dans le contexte de l'étude, l'approche multiobjective permet de considérer des critères supplémentaires, comme l'acceptabilité sociale mentionnée au préalable ou l'intégration des autres polluants écartés.

Si l'approche multiobjective est considérée, l'AMém peut posséder un meilleur potentiel. Comme elle constitue une métaheuristique, elle conserve l'avantage de fournir une approche de conception appliquée au contexte (Sörensen & Glover, 2013). L'intégration de cette approche vient, d'un côté, changer le multigraphe $\Gamma = (V, E)$ pour ne considérer que les variables indépendantes nécessaires pour tous les indicateurs. D'un autre côté, l'approche modifie la fonction d'évaluation $F(S)$. De cette manière, le multigraphe $\Gamma = (V, E)$ peut détenir les propriétés de la distance, du nombre de bâtiments, du nombre de logements et de la demande. L'AMém modélise les autres propriétés à la demande au lieu de les modéliser au préalable, comme cela a été le cas dans le cadre de la présente l'étude. Ainsi, lors de l'évaluation $F(S)$ d'un agencement d'itinéraires, toutes les équations modélisées par l'approche méthodologique sont considérées et comparées. L'évaluation s'applique sur un ensemble de différents critères d'optimisations et la comparaison s'applique sur tous les éléments de cet ensemble (Pourreza Movahed et al., 2020). Dans cette même optique, les heuristiques présentes dans l'approche de Lacomme et al. (2004) peuvent conserver le critère d'optimisation du temps et fournir des pistes de départs. Or, l'AMém peut avoir plus de probabilités à trouver des solutions différentes.

4.3 Perspectives du modèle

Bien que le potentiel de l'AMém paraisse limité, le modèle demeure générique. Ainsi, l'étude a relevé un défi méthodologique de planifier des itinéraires. Pour une application autre que

l'étude de cas de ce mémoire, le défi devient plutôt de modéliser les données d'entrées nécessaires pour le modèle. Dans cette optique, cette section traite des perspectives d'application du modèle et propose des pistes de modélisation. Plus particulièrement, elle traite de l'application à d'autres contextes territoriaux, à d'autres problèmes de planification d'itinéraires et à la collecte à la demande.

4.3.1 Application à d'autres contextes territoriaux

La multitude de données ouvertes qu'offre la Ville de Montréal (Ville de Montréal, 2013a, 2013b, 2013d, 2013e, 2017, 2019) facilite l'étude de cas au contexte montréalais. Cela étant, bien que le modèle ait considéré certaines particularités de Montréal, il a été formulé dans une optique d'application sur d'autres territoires. Ainsi, pour une exécution sans hypothèses simplificatrices supplémentaires, le modèle nécessite minimalement un ensemble de bâtiments B , un ensemble de tronçons R , une assignation de ménage C , un bilan massique et des arrondissements. Les bâtiments, plus précisément, doivent posséder la propriété du nombre de logements $n_l(b)$. Les tronçons, quant à eux, doivent posséder la propriété de sens de la circulation (sens unique ou double sens). L'assignation des ménages, finalement, peut être omise avec une hypothèse simplificatrice basée sur une répartition uniforme entre les tailles des ménages. Par ailleurs, à l'exception de l'assignation de ménage, ces données doivent être spatiales. Si l'ensemble minimal ci-haut est considéré, des calculs supplémentaires doivent être effectués par rapport à la méthodologie proposée par l'étude. Le Tableau 4.3 revoit les éléments facilités par les jeux de données et propose des pistes de solutions si ces éléments sont absents lors d'une étude dans un autre contexte territorial.

Tableau 4.3 Étapes de traitements pour les informations manquantes qui facilitent le traitement des données

Informations disponibles qui facilitent le traitement des données	Étapes de traitement en absence de l'information
---	--

Les jeux de données rapportent les adresses par tronçon et par bâtiment	Associer, approximativement, le bâtiment au tronçon le plus proche en considérant une droite entre l'un des côtés du bâtiment et les droites du réseau routier
Les jeux de données rapportent les arrondissements pour les tronçons et pour les bâtiments	Associer les jeux de données en dénombrant les entités (tronçons ou bâtiments), au sein du polygone géographique des arrondissements. Pour les tronçons, ceux qui traversent des arrondissements ou ceux qui longent les frontières doivent être comptés pour les deux arrondissements.
Les jeux de données classifient les tronçons pour le calcul de la vitesse	Supposer, comme hypothèse simplificatrice, une vitesse moyenne pour tous les tronçons.

En dehors des jeux de données et des calculs proposés par le Tableau 4.3, certains paramètres de l'étude dépendent du contexte territorial, notamment le nombre de centres de conditionnement et de scénarios. Ainsi, pour une application dans un autre contexte, toute la scénarisation doit être adaptée.

4.3.2 Application à d'autres planifications d'itinéraires

Le problème de routage d'arête avec capacité (CARP) demeure un problème d'algorithme fondamental qui peut s'appliquer à des contextes réels comme la collecte de MR (Lacomme et al., 2004), l'épandage de sels en hiver (Eglese, 1994), la collecte de la neige (Labelle, Langevin, & Campbell, 2002) ou la livraison de colis (Chen, Golden, Wong, & Zhong, 2009). Ces contextes ont en commun qu'ils peuvent être modélisés en un multigraphe $\Gamma = (V, E)$, qu'ils détiennent une capacité maximale de chargement et qu'ils doivent servir une demande agrégée sur un tronçon, éléments nécessaires au CARP (Lacomme et al., 2004). Entre autres, l'épandage de sels et la livraison de colis peuvent se voir à l'inverse où le camion commence son itinéraire chargé et qu'il le vide au fur à mesure qu'il dessert son itinéraire (Eglese, 1994; Wong, 2008). Également, la collecte de la neige fait intervenir plusieurs véhicules : un chasse-neige pour placer la neige au milieu de la rue, une souffleuse et un camion de chargement pour collecter la neige (Labelle et al., 2002). Le Tableau 4.4 propose des façons dont peuvent être considérées les propriétés du multigraphe $\Gamma = (V, E)$ pour différents contextes d'application.

Pour rappel, ces propriétés sont la demande $m_r(e)$, le cout de service $c_c(e)$ et le cout de passage $c_t(e)$.

Comme le suggère le Tableau 4.4, le cout de passage proposé demeure applicable à d'autres contextes territoriaux. Les vitesses moyennes peuvent toutefois être adaptées aux conditions hivernales. Également, pour tous les contextes, les tronçons à double sens devront être scindés en deux. De plus, la collecte de la neige détient la particularité que pour un tronçon à sens unique, la collecte doit s'appliquer deux fois, une pour chaque côté du tronçon (Labelle et al., 2002). Ces adaptations varient donc la modélisation du multigraphe $\Gamma = (V, E)$. Or, dans la mesure où celui-ci est modélisé, l'AMém ou les heuristiques peuvent l'utiliser pour planifier les itinéraires. Par la suite, l'évaluation de la performance environnementale et économique doit être revue pour considérer les différents types de véhicules utilisés.

Tableau 4.4 Approche de modélisation du multigraphe $\Gamma = (V, E)$ selon le contexte à l'étude

Contexte à l'étude	Propriété	Approche de modélisation
Épandage de sels en hiver	$m_r(e)$	La demande de sel pour un tronçon dépendrait de la longueur du tronçon à être desservi et de la vitesse à laquelle le camion épand du sel (Eglese, 1994)
	$c_c(e)$	Le camion pourrait rouler à une vitesse inférieure lorsqu'il épand du sel sur le tronçon (Eglese, 1994)
	$c_t(e)$	Le cout de passage peut être similaire à celle proposée par l'étude ou adapté aux conditions hivernales
Collecte de la neige	$m_r(e)$	La demande de neige se modéliserait selon le volume de neige à collecter par tronçon (Labelle et al., 2002)
	$c_c(e)$	Le cout de collecte doit se modéliser en fonction des trois véhicules nécessaires et en deux passes, une pour le chasse-neige et une autre pour la souffleuse et le camion de chargement (Labelle et al., 2002)
	$c_t(e)$	Le cout de passage peut être similaire à celle proposée par l'étude ou adapté aux conditions hivernales si la souffleuse est en mesure de rouler aussi rapidement que les camions
Livraison de marchandises	$m_r(e)$	La demande est plutôt un nombre de colis à livrer pour un tronçon donné et une journée donnée (Wong, 2008)

	$c_c(e)$	Le cout de collecte peut être modélisé de manière semblable à l'étude. En revanche, le nombre d'arrêts dans un tronçon est variable selon la demande et non le nombre de logements (Chen et al., 2009)
	$c_t(e)$	Le cout de passage peut être le même que celui proposé par l'étude

4.3.3 Collecte à la demande

Comme le suggèrent les résultats, la décentralisation exerce une faible influence sur les rues à collecter. Le seul élément qui peut varier la performance environnementale se situe dans la notion de chargement qui peut varier selon l'ordre des rues à collecter. Ainsi, la décentralisation devrait s'appliquer à d'autres processus de la GMR, dont la collecte et le transport des MR. Une perspective de décentralisation de la collecte et transport repose sur la collecte à la demande. Cette dernière semble plus étudiée pour la collecte de produits électroniques en fin de vie (Nowakowski, Król, & Mrówczyńska, 2017; Szwarc, Nowakowski, & Boryczka, 2021).

Ce mode de collecte pose notamment des défis sur la prédiction de la demande (Nowakowski et al., 2017). En effet, pour la collecte à la demande, les MR générées peuvent davantage se rapporter sur les ménages (Szwarc et al., 2021). En contrepartie, pour la collecte sur trottoir, les MR générées se rapportent sur le tronçon (Lacomme et al., 2004). Cette différence dans la manière de rapporter les MR vient également changer le problème fondamental étudié. Dans la collecte à la demande, un problème de routage de véhicule avec capacité (CVRP) semble mieux adapté (Duzgun et al., 2016) que le CARP. Ainsi, le défi méthodologique se pose à la fois sur la modélisation de la demande dynamique et sur la planification des itinéraires en lien avec cette demande dynamique (Nowakowski et al., 2017). Cette modélisation augmente le volume de données et, conséquemment, le nombre de traitements nécessaires.

Malgré les défis supplémentaires de modélisation, elle permet, d'un point de vue opérationnel, de réduire le cout d'exploitation et de changer le véhicule utilisé (Nowakowski et al., 2017).

La présence de la décentralisation favorise aussi la considération de véhicules de plus petite capacité puisque les itinéraires pourraient intégrer des boucles plus courtes qu'un contexte centralisé.

Pour les MR municipales, un seuil critique de division des gisements devrait exister, ce qui pose une potentielle limite à la collecte à la demande. Si ce seuil est dépassé, la collecte à la demande constitue une solution moins viable. Pour illustrer ce seuil critique, selon la dynamique des 4R-VD (Hausler, 1999), un changement dans la configuration de la collecte (récupération) affecte dès lors le conditionnement, le recyclage ou la valorisation. Par exemple, elle peut fournir un intrant moins stable pour le traitement des MR, ce qui peut avoir un impact, à son tour, sur la performance économique du processus. Le changement de la configuration se reflète aussi dans le changement de la génération. En effet, la collecte en bordure de trottoir assure que les ménages déposent des MR en quantité variable toutes les semaines. En revanche, dans une collecte à la demande, la quantité de MR par logement deviendrait potentiellement plus uniforme étant donné qu'un ménage ferait appel au service de collecte chaque fois qu'un contenant est plein. En contrepartie, la fréquence de demande de service pourrait être variable et dépendre, notamment, des habitudes de consommation et du nombre de personnes dans le logement. Ceci demeure des hypothèses quant au comportement de ce mode de collecte. Ces hypothèses doivent être validées. Dans cette optique, le modèle développé par cette étude permet une base comparative puisque la collecte sur trottoir deviendrait un scénario de référence. Toutefois, pour la collecte à la demande, un nouveau modèle, basé sur le CVRP, devra être développé.

En résumé, les perspectives suggèrent que le modèle demeure générique et qu'il permet de s'adapter à d'autres contextes territoriaux et à d'autres problèmes de planification d'itinéraires. Également, dans une certaine mesure, il permet aussi l'étude de la collecte à la demande. Plus largement, le modèle peut aussi étudier l'impact de l'évolution de la demande de MR sur le processus de collecte et de transport et appréhender des questions économiques sur la décentralisation.

CONCLUSION

Les MR tendent à augmenter au fil du temps (Hoornweg & Bhada-Tata, 2012; Kaza et al., 2018; RECYC-QUÉBEC, 2020; Ville de Montréal, 2013e). Pour répondre à cette augmentation de la demande, les centres de traitement centralisés (tri, conditionnement, recyclage, valorisation et élimination) doivent avoir recours à davantage de camions (Kuznetsova et al., 2019). Bien que cette approche amène une économie d'échelle, elle accentue la pression sur le réseau routier et sur les émissions de GES (Kuznetsova et al., 2019). À l'inverse, la décentralisation propose une approche en réseau. Cette dernière pourrait être résiliente aux pannes, réduire les frais d'exploitation et les émissions de GES (Kuznetsova et al., 2019) au détriment d'une perte de l'économie d'échelle.

Ce projet de recherche a étudié l'impact de la présence de plusieurs centres de conditionnements sur la collecte et le transport et sur le transport post-tri. La méthodologie a consisté, d'abord, à établir des scénarios de décentralisation (nombre de centres déployés) pour un territoire donné. Dans ces scénarios, un scénario de référence (contexte actuel) a également été établi pour des bases comparatives. Ces centres, couplés avec une modélisation de la génération des MR, a ainsi permis de modéliser un multigraphe $\Gamma = (V, E)$ orienté et pondéré qui a alimenté l'algorithme mémétique (AMém). Cet algorithme a permis de planifier les itinéraires en considérant la capacité des camions et en minimisant le temps total de la collecte. Ces itinéraires ont ensuite permis une évaluation de la performance (coûts d'investissement et d'exploitation et émissions de GES) pour un scénario donné. L'ensemble de la méthodologie a été appliqué à une étude de cas à Montréal pour une filière de PET où 1,15 kt de MRec, réparti sur 22 326 tronçons, sont à récupérer dans le territoire.

Les résultats de l'étude ont démontré que la décentralisation demeure un gain opérationnel. En effet, pour tous les scénarios, les GES et les coûts d'exploitations tendent à diminuer. Notamment, le scénario décentralisé présente une réduction de 20,3 % pour les GES et 8,04 % pour les coûts. En contrepartie, le plus grand frein à cette approche demeure le coût

d'investissement qui constitue la principale dépense de l'approche et qui occupe une place plus prépondérante dans un contexte décentralisé. Cette dépense peut atteindre jusqu'à 89,7 % des coûts associés à un scénario décentralisé. Cette limitation pourrait être levée si une mutualisation de l'infrastructure est considérée pour d'autres filières de la GMR. D'ailleurs, la décentralisation permet une meilleure flexibilité des itinéraires. En effet, dans un scénario décentralisé, une tonne en moins se trouve dans les camions, en moyenne et les itinéraires diminuent leur distance de 35,3 % avant de parcourir une tonne. Ainsi, elles pourraient être plus résilientes face à un changement de la génération de MR. Elle permettrait également d'envisager d'autres véhicules pour la collecte ou d'autres sources d'énergie.

Le modèle proposé pourrait être simplifié lorsqu'une planification en un seul objectif est considérée. En revanche, l'intégration de plusieurs objectifs, contradictoires ou non, pourrait mettre en avant le potentiel de l'AMém. Cette intégration d'objectifs peut se reposer sur des perspectives d'intégration au contexte territorial actuel. Malgré tout, le modèle de collecte et de transport, basé sur le problème fondamental du routage d'arêtes avec capacité (CARP), demeure générique et applicable à d'autres contextes territoriaux ou d'affaires. Par exemple, l'approche méthodologique pourrait planifier des itinéraires pour comme ceux liés à l'épandage de sels (Eglese, 1994), la collecte de la neige (Labelle et al., 2002) ou la livraison de colis (Chen et al., 2009).

En regard des résultats, les présents travaux soulèvent que la décentralisation agit sur 19,8 % des coûts du processus de collecte et de transport. Dans cette perspective, la collecte à la demande viendrait apporter la décentralisation au processus de collecte et de transport pour ainsi réduire la rigidité des modes de collecte actuels.

ANNEXE I

COMPOSANTS DE L'ALGORITHME MÉMÉTIQUE

Cette annexe détaille les composants de l'algorithme mémétique sous la forme d'algorithmes. Pour chacun des algorithmes présentés dans cette annexe, ce dernier est montré en pseudo-code et accompagné d'une description. Ils reprennent la description de Lacomme et al. (2004), mais demeurent adaptés au contexte de l'étude de cas.

Le premier algorithme présenté est celui de la stratégie de division, utilisé par la phase de recherche dans l'algorithme mémétique et par l'heuristique d'Ulusoy. Il divise une séquence de rues à collecter en un agencement optimal d'itinéraires, comme le montre l'Algorithme-A I-1.

Dans Algorithme-A I-1, la notation $\sigma(k)$ fait référence au centre de conditionnement le plus proche. L'Algorithme-A I-1 calcule des agencements d'itinéraires possibles et retient celui qui demeure optimal. Ce dernier se maintient à jour au fil de l'exécution de l'algorithme. Une fois le cout total et le nombre de camions trouvé, ces propriétés sont reprises pour trouver l'agencement des itinéraires de la séquence T. Une fois cet agencement trouvé, le cout total et l'agencement sont retournés pour être enregistrés en mémoire.

Algorithme-A I-1 Division d'une séquence de rue
à collecter en un agencement d'itinéraires
Adapté de Lacomme et al. (2004)

```

Fonction Partitionnement( $\Gamma = (V, E), D, T, a, l$ )
 $\tau \leftarrow |T|, L \leftarrow \{0\} + \{\infty\} * \tau, P \leftarrow \{\text{nul}\} * \tau$ 
 $\tau \leftarrow \tau + 1$ 
Pour  $i \leftarrow 0$  à  $\tau$ 
     $l_v \leftarrow 0, a_v \leftarrow 0, j \leftarrow i + 1$ 
    Tant que  $j < \tau \wedge a_v \leq a \wedge l_v \leq l$ 
         $a_v \leftarrow a_v + d(T_{j-1})$ 
        Si  $i = j - 1$ 
             $i_s \leftarrow \text{idx}(T_i), l_v \leftarrow D_{\sigma(i_s), i_s} + c_c(T_i) + D_{i_s, \sigma(i_s)}$ 
        Sinon
             $j_s \leftarrow \text{idx}(T_{j-1}), j_{s-1} \leftarrow \text{idx}(T_{j-2}),$ 
             $l_v \leftarrow D_{j_{s-1}, \sigma(j_{s-1})} + D_{j_{s-1}, j_s} + c_c(T_{j-1}) + D_{j_s, \sigma(j_s)}$ 
        Si  $a_v \leq a \wedge l_v \leq l$ 
             $l_n \leftarrow L_i + l_v$ 
            Si  $l_n < L_j \vee (l_n = L_j \wedge P_i + 1 < P_j)$ 
                 $L_j \leftarrow l_n, P_j \leftarrow i$ 
             $j \leftarrow j + 1$ 
     $u \leftarrow 0, v \leftarrow \tau - 1, C \leftarrow \{v\}, p \leftarrow P_v$ 
    Tant que  $p \neq u$ 
         $C \leftarrow C \cup \{p\}, p \leftarrow P_p$ 
     $C \leftarrow C \cup \{u\}$ 
    Inverser  $C$ 
     $I \leftarrow \emptyset, k \leftarrow 1$ 
    Pour  $i \leftarrow 0$  à  $|C|$ 
        Si  $\text{idx}(i) < |C| - 1$ 
             $d \leftarrow C_{i+1} - \text{idx}(i), I \leftarrow I \cup \{k\} * d, k \leftarrow k + 1$ 
    Retourner  $L_{\tau-1}, I$ 

```

Le prochain algorithme se concentre plutôt sur la mise en place d'une phase de recherche, qui démarre après l'initialisation de l'algorithme. L'objectif est de trouver un chromosome optimal, comme le montre l'Algorithme-A I-2.

Algorithme-A I-2 Recherche d'un chromosome
idéal
Adapté de Lacomme et al. (2004)

Fonction Recherche($p_{rl}, c_{p_{\max}}, c_{np_{\max}}, b_i, \Pi$)
 $c_p \leftarrow 0, c_{np} \leftarrow 0, F_{\Pi} \leftarrow \{\forall s \in \Pi, F(s)\}$
 Tant que $c_p < c_{p_{\max}} \wedge c_{np} < c_{np_{\max}} \wedge F(\Pi_0) > b_i$
 $p_1, p_2 \leftarrow$ Tournoi binaire
 $c \leftarrow \text{ox}(p_1, p_2)$
 Partionnement(c)
 $r \leftarrow \mathcal{U}_{\mathbb{R}}[0,1[$
 $k \leftarrow \left(\left(\left(|\Pi| - \frac{|\Pi|}{2} \right) * r + \frac{|\Pi|}{2} \right) - 1 \right)$
 Si $r < p_{rl}$
 $m \leftarrow \text{rechercheLocale}(c)$
 Partionnement(c)
 Si $F(m) \notin F_{\Pi} \vee F(\Pi_k) = F(m)$
 $c \leftarrow m$
 Si $F(c) \notin F_{\Pi} \vee F(\Pi_k) = F(c)$
 $c_p \leftarrow c_p + 1$
 Si $F(c) < F(\Pi_0)$
 $c_{np} \leftarrow 0$
 Sinon
 $c_{np} \leftarrow c_{np} + 1$
 $F_{\Pi} \leftarrow (F_{\Pi} / \{F(\Pi_k)\}) \cup \{F(C)\}$
 $\Pi_k \leftarrow C$
 Trier Π selon l'évaluation des chromosomes

L'Algorithme-A I-2 applique des croisements à l'aide de deux parents, sélectionné par un tournoi binaire dans la population Π . L'enfant ainsi obtenu peut être soumis à la recherche

locale selon la probabilité de recherche locale p_{rl} . L'Algorithme-A I-2 s'arrête si la borne inférieure b_i est atteinte ou si le nombre de croisements productifs $c_{p_{\max}}$ ou le nombre de croisements non productif $c_{np_{\max}}$ ont été atteints. Le nombre de croisements et la probabilité de recherche locale peuvent varier selon la phase de recherche. Deux algorithmes supplémentaires sont mentionnés par la recherche : la recherche locale et les croisements. La recherche locale est reprise telle quelle de l'approche de Lacomme et al., (2004). Le croisement, quant à lui, consiste à utiliser les séquences de tâches T des deux parents pour créer un chromosome enfant. L'Algorithme-A I-3 indique la méthode de croisement

Algorithme-A I-3 Croisement de deux chromosomes
Adapté de Lacomme et al. (2004)

```

Fonction  $ox(p_1, p_2, pqt(G(V, E)))$ 
 $\tau \leftarrow |T(p_1)|, m = \{\text{vrai} \mid \forall \tau \in T(p_1)\}, c \leftarrow \emptyset, p \leftarrow \mathcal{U}_{\mathbb{N}}[0, \tau[$ 
Si  $p = 0$ 
     $q \leftarrow \mathcal{U}_{\mathbb{N}}[0, \tau - 1[$ 
Sinon
     $q \leftarrow \mathcal{U}_{\mathbb{N}}[p, \tau]$ 
Pour  $i \leftarrow p$  à  $q + 1$ 
     $T(c)_i \leftarrow T(p_1)_i$ 
Si  $q \neq \tau - 1$ 
     $i \leftarrow q \bmod (\tau - 1) + 1$ 
Sinon
     $i \leftarrow q \bmod (\tau - 1)$ 
 $j \leftarrow i, i_d \leftarrow i$ 
Faire
     $T(c)_j \leftarrow T(p_2)_i$ 
Si  $j \neq \tau - 1$ 
     $j \leftarrow j \bmod (\tau - 1) + 1$ 
Sinon
     $j \leftarrow j \bmod (\tau - 1)$ 
Si  $i \neq \tau - 1$ 
     $i \leftarrow i \bmod (\tau - 1) + 1$ 
Sinon

```

$$i \leftarrow i \bmod (\tau - 1)$$

Tant que $i \neq i_d$

Retourner c

L'Algorithme-A I-3 sélectionne deux nombres au hasard avec le soin d'éviter de copier l'un des deux parents. Il copie ensuite, de manière linéaire, les tâches de la séquence T du premier parent entre l'indice p et l'indice q . Par la suite, l'algorithme complète circulairement les tâches manquantes avec le second parent.

ANNEXE II

MODULARISATION DES COUTS DES CENTRES DE CONDITIONNEMENT

Cette annexe présente les calculs nécessaires pour modulariser le cout de tri propre à l'étude de cas. En effet, l'étude modularise le cout par la jonction des couts de tri (Éco Entreprises Québec & RECYC-QUÉBEC, 2016), du taux de rejet moyen des centres de conditionnements selon leur catégorie (Langlois-Blouin et al., 2021) et de la caractérisation des matières sortantes des centres de tri (Éco Entreprises Québec & RECYC-QUÉBEC, 2020). Pour amorcer le calcul, le Tableau-A II-1 propose le cout net du tri par catégorie de matière recyclable.

Tableau-A II-1 Couts pondérés des matières recyclables selon les matières sortantes des centres de tri
Adapté d'Éco Entreprises Québec & RECYC-QUÉBEC (2016, 2020)

Catégorie de matière recyclable	Cout de tri (\$/t)	Revenu (\$/t)	Cout net (\$/t)	Pondération (%)	Cout pondéré (\$/t)
Journaux	49,00	79,00	(30,00)	8,57	(2,57)
Imprimés	48,00	76,00	(28,00)	22,9	(6,40)
Contenants et emballages de papier et carton	109,00	85,00	24,00	22,9	5,49
Contenants et emballages de plastique	365,00	155,00	210,00	22,9	48,00
Contenants et emballages d'aluminium	281,00	590,00	(309,00)	2,86	(8,83)
Contenants et emballages d'acier	107,00	171,00	(64,00)	2,86	(1,83)
Contenant et emballages de verre	11,00	(23,00)	34,00	17,1	5,83 \$

Dans le Tableau-A II-1, chacun des couts par catégorie est pondéré selon le pourcentage de matière sortante du centre de tri. Également, un cout net négatif, dont la valeur est entre parenthèses, représente un revenu. Le cout total du tri des MRec est donc situé à 39,69 \$/t. Ce

cout peut être modulé selon la catégorie du centre de tri puisque ce dernier contient un taux de rejet variable (Langlois-Blouin et al., 2021). Or, la sensibilité sur le cout modularisé est inconnue. Ainsi, pour modulariser le cout, l'étude suppose que le rejet suit la pondération présentée dans le Tableau-A II-1. Dans cette optique, le Tableau-A II-2 présente les catégories de centre de tris, rappellent leur capacité d'accueil annuelle et précise le taux de rejet moyen.

Tableau-A II-2 Taux de rejet moyen selon la catégorie du centre de tri
Tiré de Langlois-Blouin et al. (2021)

Catégorie du centre de tri	Capacité d'accueil (kt/an)	Nombre de centre	Taux de rejet moyen (%)
Petite capacité	0 à 20	7	13,1 ± 3,6
Moyenne capacité	20 à 40	11	15,9 ± 7,7
Grande capacité	40 et plus	9	16,3 ± 4,6

Le taux de rejet moyen, tous centres confondus, est donc situé à 15,3 % sous l'hypothèse simplificatrice que le taux de rejet moyen spécifié au Tableau-A II-2 omet l'écart-type. Le nombre de centres présenté au Tableau-A II-2 pondère cette moyenne. L'écart des centres par rapport à cette moyenne vient donc modulariser le cout, ce qui conduit au cout présenté au Tableau 2.14. Ce tableau est rappelé dans cette annexe grâce au Tableau-A II-3.

Tableau-A II-3 Cout modularisé du conditionnement de matières résiduelles selon la catégorie du centre de conditionnement
Adapté
d'Éco Entreprises Québec & RECYC-QUÉBEC (2016, 2020)
et de Langlois-Blouin et al. (2021)

Catégorie du centre de conditionnement	Cout modularisé (\$/t)
Petite	37,55
Moyenne	40,26
Grande	40,65

ANNEXE III

DONNÉES DE GÉNÉRATION DES MATIÈRES RÉSIDUELLES DE LA VILLE DE MONTRÉAL

Pour compléter les résultats présentés dans la section 3.1, cette annexe détaille les éléments de la génération de MR pour l'ensemble de Montréal. Le Tableau-A III-1 présente d'abord le taux d'inoccupation de chaque arrondissement. Les arrondissements considérés pour la collecte sont mis en gras.

Tableau-A III-1 Taux d'inoccupation estimé selon l'arrondissement

Arrondissement	Taux d'inoccupation (%)
Ahuntsic-Cartierville	6,64
Anjou	6,84
Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce	7,75
L'Île-Bizard–Sainte-Geneviève	2,05
Lachine	9,32
LaSalle	7,88
Le Plateau-Mont-Royal	11,9
Le Sud-Ouest	5,01
Mercier–Hochelaga-Maisonneuve	5,75
Montréal-Nord	8,03
Outremont	10,9
Pierrefonds-Roxboro	4,96
Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles	3,68
Rosemont–La Petite-Patrie	6,16
Saint-Laurent	7,13
Saint-Léonard	7,22
Verdun	6,69
Ville-Marie	13,6
Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension	6,52

Ville de Montréal	7,54
-------------------	------

Le taux d'inoccupation moyen de la Ville de Montréal est donc estimé à 7,54 %, une valeur plus faible que le taux d'inoccupation moyen des sept arrondissements de la collecte (sous-territoire montréalais), situé à 9,10 %. Le Tableau-A III-2 présente la population générée par le modèle (simulation) selon l'approche stochastique de la population. Le tableau présente la valeur de référence ajustée pour le modèle et la compare avec la valeur de la population. Pour rappel, cette valeur est basée sur un recensement théorique où tous les ménages sont occupés. Elle présente également la valeur de référence, tirée de l'annuaire statistique de Montréal (Montréal en statistiques, 2022).

Alors que les 7 arrondissements de collecte montrent, en moyenne, une erreur de 0,0461 %, l'erreur sur la Ville de Montréal indique plutôt une sous-représentation de la population au sein du modèle avec une valeur de -0,116 %. Les valeurs sont également situées entre -1,43 % et 1,48 % comparativement à -0,501 % et 0,510 % pour les arrondissements de la collecte.

Tableau-A III-2 Comparaison de la population générée par le modèle et de la référence ajustée selon les arrondissements

Arrondissement	Population (individus)			Erreur ⁴ (%)
	Référence ¹	Référence ajustée ²	Simulation ³	
Ahuntsic-Cartierville	135 336	144 954	146 011	0,729
Anjou	43 243	46 420	46 381	-0,0840
Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce	170 583	184 912	184 547	-0,197
L'Île-Bizard–Sainte-Geneviève	18 885	19 280	19 566	1,48
Lachine	46 428	51 199	51 325	0,246
LaSalle	82 235	89 273	88 793	-0,538
Le Plateau-Mont-Royal	105 813	120 118	119 878	-0,200
Le Sud-Ouest	84 553	89 014	89 162	0,166
Mercier–Hochelaga-Maisonneuve	140 627	149 202	147 076	-1,42
Montréal-Nord	88 471	96 200	95 441	-0,789
Outremont	24 629	27 630	27 494	-0,492
Pierrefonds-Roxboro	70 382	74 053	73 592	-0,623
Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles	107 941	112 070	111 543	-0,470
Rosemont–La Petite-Patrie	141 813	151 126	151 394	0,177
Saint-Laurent	102 104	109 947	110 403	0,415
Saint-Léonard	79 495	85 685	85 256	-0,501
Verdun	70 377	75 425	75 543	0,156
Ville-Marie	104 944	121 515	121 625	0,0908
Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension	145 090	155 212	156 004	0,510
Total	1 762 949	1 903 235	1 901 034	-0,116
¹ Valeur tirée de l'annuaire statistique de 2021				
² Valeur d'un recensement théorique à un taux d'occupation de 100 %.				

³Valeur générée stochastiquement (Algorithme 2.1)

⁴Erreur calculée entre la simulation et la référence ajustée

Sur la génération, le Tableau-A III-3 compare les MRec annuelles générés par le modèle avec une valeur de référence. Cette valeur de référence est basée sur une génération moyenne de la population de 2014 à 2018, rapportée par les bilans massiques de la ville de Montréal (Ville de Montréal, 2013e), multiplié par la population de référence du Tableau-A III-2.

Tableau-A III-3 Comparaison des matières recyclables générés par le modèle et de la valeur de référence selon les arrondissements

Arrondissement	MRec générées (t/an)		Erreur (%)
	Référence ajustée	Simulation	
Ahuntsic-Cartierville	10 335	10 422	0,841
Anjou	3 110	3 110	0,00343
Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce	14 003	13 991	-0,0859
L'Île-Bizard–Sainte-Geneviève	1 917	1 948	1,61
Lachine	4 326	4 341	0,352
LaSalle	7 733	7 698	-0,448
Le Plateau-Mont-Royal	11 341	11 333	-0,0750
Le Sud-Ouest	7 681	7 703	0,286
Mercier–Hochelaga-Maisonneuve	12 680	12 509	-1,34
Montréal-Nord	6 993	6 944	-0,698
Outremont	2 632	2 622	-0,383
Pierrefonds-Roxboro	6 094	6 062	-0,531
Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles	9 516	9 479	-0,384
Rosemont–La Petite-Patrie	14 265	14 306	0,284
Saint-Laurent	7 727	7 767	0,512
Saint-Léonard	5 893	5 870	-0,396
Verdun	7 767	7 786	0,247
Ville-Marie	12 727	12 749	0,176

Villeray–Saint-Michel–Parc-Extension	9 453	9 511	0,612
Total	156 191	156 149	-0,0271

Contrairement à la population, l'erreur de génération est plus faible pour l'ensemble de la Ville de Montréal. Or, dans ces valeurs possibles, elles varient pour atteindre -1,34 % à 1,61 %. Le facteur aléatoire, situé à 5 % ne perturbe pas le modèle dans l'ensemble de la ville. Or, comme rapportées dans la section 3.2.1, certaines variations peuvent être observées à l'intérieur des arrondissements.

ANNEXE IV

DONNÉES DU MULTIGRAPHE DU RÉSEAU ROUTIER SUR LA VILLE DE MONTREAL

Pour compléter les résultats présentés dans la section 3.2, cette annexe détaille les éléments du multigraphe $\Gamma = (V, E)$ du réseau routier appliqué à tout le territoire. Pour rappel, le modèle génère 75 120 arêtes pour l'ensemble de la Ville de Montréal et 16 754 se retrouvent dans les sept arrondissements de la collecte (sous-territoire montréalais). Le Tableau-A IV-1 illustre les statistiques sur le multigraphe $\Gamma = (V, E)$ de la Ville de Montréal. Pour rappel, le temps de passage est déterminé selon la longueur et la vitesse moyenne du tronçon. Le temps de collecte se calcule en fonction de la longueur du tronçon, du nombre de bâtiments et du nombre de logements. Les MRec hebdomadaires se calculent en fonction du nombre de logements qui se trouvent sur le tronçon.

Tableau-A IV-1 Statistiques de distribution sur le temps de passage, le temps de collecte et les matières recyclables du multigraphe $\Gamma = (V, E)$ de la Ville de Montréal

Statistiques	Temps de passage (s)	Temps de collecte (s)	Matières recyclables hebdomadaires par tronçon (kg)
Moyenne	13,3	75,4	97,5
Médiane	9,55	54,2	39,0
Écart-type	12,4	64,4	208
Minimum	0,208	25,7	0,940
Maximum	399	2 294	10 823

Pour rappel, dans le Tableau-A IV-1, le temps de collecte et les MRec hebdomadaires excluent les arêtes qui n'en détiennent pas. Au total, 43 753 arêtes sont ainsi exclues de ces deux colonnes. De plus, les MRec hebdomadaires sont basés sur le mois de novembre, dont le taux mensuel de variation se situe le plus proche de 1. Le total des MRec à collecter est situé à

3 067 t. Deux arêtes sont en dessous du maximum de chargement de camion, situé à 9 t. Dans ce cas, le modèle de collecte divisera l'arête en 2, dont l'une aura 9 t et l'autre aura le reste des MRec à collecter.

Pour l'ensemble de la Ville de Montréal, les dispersions demeurent plus accentuées que les sept arrondissements de collecte. De plus, certains tronçons demeurent particulièrement longs, comme le boulevard Gouin, à l'est de Montréal qui possède une longueur de 3,32 km (Ville de Montréal, 2013b). Ce tronçon agrège également des bâtiments, ce qui monte le temps de collecte du tronçon à 2 294 s. Également, la présence de tous les tronçons disperse davantage les statistiques sur les propriétés du multigraphe $\Gamma = (V, E)$ du réseau routier. Notamment, l'écart-type se dépasse des valeurs médianes pour les mesures de temps. Dans les trois cas, des valeurs aberrantes se trouvent dans les résultats du modèle. Or, elles marquent davantage les MRec hebdomadaires du mois de novembre où la moyenne est 2,50 fois supérieure à la médiane et où l'écart-type est 2,13 fois supérieur à la moyenne.

ANNEXE V

CALIBRATION DE L'ALGORITHME MÉMÉTIQUE

L'algorithme mémétique nécessite une validation sur l'ensemble des bancs d'essai et une calibration pour les données montréalaises. Cette annexe compare d'abord l'implémentation de la présente étude à celle de Lacomme et al. (2004) à l'aide des bancs d'essai. Ensuite, l'annexe traite de la calibration pour les données montréalaises. Cette calibration se caractérise par la sélection des paramètres d'exécution et leurs impacts sur les bancs d'essai.

Pour les heuristiques, le comportement général diffère de celui de l'implémentation de Lacomme et al. (2004). Le Tableau-A V-1 relate les performances des heuristiques selon les implémentations et les bancs d'essai. Pour chaque banc d'essai, l'implémentation de référence (ref.) de Lacomme et al. (2004) est comparé à celle de l'étude (impl.) sous la base du cout total de la solution. L'erreur relative (err.) entre les implémentations est rapportée sous forme de pourcentage.

Comme le montre le Tableau-A V-1, l'heuristique de *Path Scanning* semble presque identique à celle de l'implémentation de référence avec seulement un banc d'essai qui détient un cout total plus élevé. En contrepartie, pour l'heuristique d'Ulusoy, 39,1 % des bancs d'essai retournent un cout total égal à l'implémentation de référence. L'erreur relative globale se situe à 2,10 % pour cette heuristique. Finalement, pour l'heuristique d'*Augment-Merge*, 56,5 % des bancs d'essai retournent le même résultat. Or, contrairement aux deux autres heuristiques, son erreur moyenne se situe à -3,80 %. La présence d'une erreur négative indique une implémentation plus performante de l'implémentation. Au niveau du minimum et du maximum, ceux-ci sont situés, respectivement, à 10,8 % et -16,0 %, ce qui montre un écart plus varié.

Tableau-A V-1 Comparaison des performances des implémentations des heuristiques sur les bancs d'essai

Instance	<i>Path Scanning</i>			<i>Augment Merge</i>			Ulusoy		
	Réf.	Impl.	Err.	Réf.	Impl.	Err.	Réf.	Impl.	Err.
gdb1	350	350	0,00	349	328	-6,02	330	330	0,00
gdb2	366	366	0,00	370	353	-4,59	353	353	0,00
gdb3	293	293	0,00	319	296	-7,21	297	297	0,00
gdb4	287	287	0,00	302	322	6,62	320	326	1,88
gdb5	438	438	0,00	423	395	-6,62	407	415	1,97
gdb6	324	324	0,00	340	319	-6,18	318	329	3,46
gdb7	363	363	0,00	325	360	10,8	330	359	8,79
gdb8	463	467	0,86	393	357	-9,16	388	392	1,03
gdb9	354	354	0,00	352	329	-6,53	358	358	0,00
gdb10	295	295	0,00	300	297	-1,00	283	314	11,0
gdb11	447	447	0,00	449	426	-5,12	413	435	5,33
gdb12	581	581	0,00	569	478	-16,0	537	546	1,68
gdb13	563	563	0,00	560	554	-1,07	552	552	0,00
gdb14	114	114	0,00	102	103	0,98	104	106	1,92
gdb15	60	60	0,00	60	62	3,33	58	58	0,00
gdb16	135	135	0,00	129	129	0,00	132	133	0,76
gdb17	93	93	0,00	91	93	2,20	93	93	0,00
gdb18	177	177	0,00	174	164	-5,75	172	174	1,16
gdb19	57	57	0,00	63	63	0,00	63	63	0,00
gdb20	132	132	0,00	129	125	-3,10	125	127	1,60
gdb21	176	176	0,00	163	163	0,00	162	164	1,23
gdb22	208	208	0,00	204	207	1,47	207	209	0,97
gdb23	251	251	0,00	237	237	0,00	239	239	0,00

Malgré une erreur élevée sur l'heuristique d'Ulusoy et sur *Augment-Merge*, l'implémentation est considérée comme acceptable. Par observation, l'agencement des arêtes du graphe influence le taux d'erreur. Or, cet agencement peut être perçu comme une subtilité de

l'algorithme dont l'interprétation peut demeurer ambiguë. Malgré tout, l'heuristique d'Ulusoy et *Augment-Merge* peut influencer la vitesse de convergence de l'algorithme étant donné que leurs solutions sont mises dans la population initiale (Lacomme et al., 2004).

Dans son ensemble, l'algorithme mémétique (AMém) trouve généralement le même cout total que Lacomme et al. (2004) sauf pour quatre bancs d'essai. Le Tableau-A V-2 détaille les performances pour chaque banc d'essai avec une comparaison de l'implémentation de référence de Lacomme et al. (2004) et de la présente étude. Pour ces deux implémentations, le Tableau-A V-2 rapporte le cout total, les croisements (crois.) et le nombre de phases de recherche. Finalement, deux lignes présentent l'erreur (err.) en pourcentage pour le cout total et le nombre de croisements. Le cout total est sans unité.

Comme le suggère le Tableau-A V-2, 4 des 23 bancs d'essai possèdent un cout total supérieur à l'implémentation de Lacomme et al. (2004). Or, seulement 9 des 23 bancs d'essai possèdent un nombre de croisements inférieur ou égal à l'implémentation de Lacomme et al. (2004). De plus, 5 des 23 bancs d'essai détiennent un nombre de phases de recherche supérieur à l'implémentation de Lacomme et al. (2004). L'erreur globale se situe à 0,48 % pour le cout total, 62,6 % pour le nombre de croisements et 50,8 % pour le nombre de phases de recherche. D'ailleurs, lorsqu'un banc d'essai ne rapporte aucun croisement et aucune phase de recherche pour l'une ou l'autre des implémentations, cela suggère que l'algorithme a trouvé la solution optimale avec les heuristiques. Dans cette optique, deux bancs d'essai se démarquent : gdb7 et gdb18. Pour gdb7, seule l'implémentation de référence trouve la solution optimale avec les heuristiques tandis que pour gdb18, seule l'implémentation de cette étude trouve la solution optimale avec les heuristiques. Elles renforcent donc l'idée susmentionnée que les heuristiques ont un comportement différent.

Malgré une erreur de croisement et de phase de recherche élevée, l'implémentation est considérée comme acceptable. En effet, ces deux indicateurs suggèrent seulement que la convergence vers la solution ne semble pas optimale. Or, comme le montre le Tableau-A V-2, les bancs d'essai qui dépassent le cout total de l'implémentation de Lacomme et al. (2004) sont

ceux qui ont nécessité les 20 phases de recherches. Cela indique qu'une modification des paramètres pourrait, éventuellement, mener à la convergence des algorithmes. Finalement, pour rappel, ce sont deux implémentations différentes du même algorithme. Certaines subtilités de l'algorithme peuvent donc avoir été interprétées de manière différente entre les deux versions et ainsi causer des écarts.

Tableau-A V-2 Comparaison des performances des implémentations des algorithmes mémétiques sur les bancs d'essai

Instance		gdb1	gdb2	gdb3	gdb4	gdb5	gdb6	gdb7	gdb8
Réf.	Cout total	316	339	275	287	377	298	325	344
	Crois.	8	2 303	179	0	779	1 183	0	47 187
	Phases	0	0	0	0	0	0	0	20
Impl.	Cout total	316	339	275	287	377	298	325	350
	Crois.	110	1 065	192	0	3 617	681	1	56 004
	Phases	0	0	0	0	0	0	0	20
Err.	Cout total	0	0	0	0	0	0	0	1,74
	Crois.	1275	-53,8	7,26	0	364	-42,4	S. O.	18,7
Instance		gdb9	gdb10	gdb11	gdb12	gdb13	gdb14	gdb15	gdb16
Réf.	Cout total	303	275	395	450	536	100	58	127
	Crois.	10 708	236	200	50 525	24 466	48	0	81
	Phases	1	0	0	20	10	0	0	0
Impl.	Cout total	309	275	395	458	544	100	58	127
	Crois.	54 050	218	11 060	48 313	46 578	8	0	777
	Phases	20	0	2	20	20	0	0	0
Err.	Cout total	1,98	0	0	1,78	1,49	0	0	0
	Crois.	405	-7,63	5 430	-4,38	90,4	-83,3	0	859
Instance		gdb17	gdb18	gdb19	gdb20	gdb21	gdb22	gdb23	
Réf.	Cout total	91	164	55	121	156	200	235	
	Crois.	0	141	4	1 150	257	3 046	24 587	
	Phases	0	0	0	0	0	0	10	
Impl.	Cout total	91	164	55	121	156	200	235	
	Crois.	7	0	7	14 857	2 343	22 878	8 852	
	Phases	0	0	0	3	0	0	0	

Err.	Cout total	0	0	0	0	0	0	0
	Crois.	S. O.	-100	75,0	1 192	812	651	-64,0

Bien que l'AMém possède une complexité de $O(|T|^3)$, le multigraphe $\Gamma = (V, E)$ qui représente le réseau routier dans les arrondissements de collecte (sous-territoire montréalais) détient 8947 arêtes à collecter. Par conséquent, des limites opérationnelles sont posées sur l'exécution de l'AMém. Pour pallier ces limitations, différentes combinaisons de paramètres d'exécutions et d'adaptations ont été testés sur le modèle. Le Tableau-A V-3 présente ces adaptations.

Tableau-A V-3 Adaptations apportés à l'algorithme mémétique pour l'exécution dans le sous-territoire montréalais

Adaptation	Justificatif
Retirer l'heuristique <i>Augment-Merge</i> du programme	Cette heuristique nécessite de trouver la meilleure opération de fusion et répéter cette dernière (Lacomme et al., 2004). Elle est l'heuristique la plus longue dans les cas d'exécution, ce qui renforce la limite opérationnelle.
Retirer les manœuvres 2-opt et mouvement de la tâche et de la suivante de la recherche locale.	2-opt est de complexité $O(n)$, ce qui alourdit l'exécution de l'AMém (Lacomme et al., 2004). Le mouvement de la tâche et de la tâche voisine, par observation sur le modèle, présente également un temps d'exécution aussi grand.
Limiter le nombre maximal de mutations dans la recherche locale	Ce critère d'arrêt peut être utilisé pour les métaheuristiques (Cormen, 2009) et a été notamment utilisé dans l'AMém de Lacomme et al., (2004). Il sert ici de critère d'arrêt supplémentaire.
Limiter la probabilité de la recherche locale	L'un des composants qui porte l'AMém à sa complexité de $O(T ^3)$ est la recherche locale avec 2-opt (Lacomme et al., 2004). Bien que 2-opt soit retiré, la recherche locale demeure une longue opération qui teste, au pire cas, toutes les combinaisons possibles d'itinéraires (Lacomme et al., 2004). Il tend à prendre plus de temps sur un itinéraire déjà optimal. En revanche, la limite proposée permet d'augmenter les probabilités d'éviter une lente exécution.
Limiter le nombre de phases de recherche à 1	70,0 % des bancs d'essai trouvent leurs solutions à l'intérieur de la première phase de recherche. De plus, seulement 13,0 %

	des bancs d'essai arrivent à trouver leur solution avec des phases de recherche supplémentaires.
Réduire le nombre de croisements maximal	Dans une optique similaire au nombre de phases de recherche, l'AMém trouve généralement sa solution avant le critère d'arrêt. Même dans les cas où l'AMém retourne une solution supérieure aux bancs d'essai, la solution qui détient ce cout total est généralement trouvée dans la première phase de recherche.

Des adaptations présentées dans le tableau Tableau-A V-3, le nombre moyen de mutations observées sur les bancs d'essai, en rapport au nombre d'arêtes à collecter $|T|$, détermine le nombre maximal de mutations pour le sous-territoire. De plus, le nombre de croisements a été calculé selon la moyenne du nombre de croisements nécessaire pour atteindre la solution retournée par l'AMém. Ce nombre reste inférieur au nombre de croisements totaux. Également, le rapport entre les croisements productifs et non productifs est conservé. En effet, les paramètres standards de Lacomme et al., (2004) proposent 3,33 fois plus de croisements productifs pour la première phase de recherche. Le nombre de croisements moyen est donc repris pour déterminer la probabilité de recherche locale. En effet, la racine cubique de cette moyenne détermine le nombre de recherches locales souhaitées dans l'exécution de l'AMém. Le rapport entre la racine cubique et le nombre de croisements moyen donne cette probabilité. Les valeurs obtenues pour chacune des adaptations sont proposées dans de Tableau-A V-4.

Tableau-A V-4 Paramètres de l'algorithme mémétique pour l'étude de cas

Paramètre	Valeur
n_c	30
p_{rl}	1,38 %
$c_{p_{max}}$	5266
$c_{np_{max}}$	1580
n_{rp}	S. O.
n_{rd}	1
Nombre maximal de mutations dans la recherche locale	$0,95 \cdot T $

Comme montré par le Tableau-A V-4, le nombre de phases de recherche est limité à une seule phase et le remplacement partiel devient donc exclu, ce qui explique l'absence du paramètre de nombre de chromosomes remplacés n_{rp} . Similairement, les nombres de recherches ne varient plus en fonction de la phase de recherche. Également, le Tableau-A V-4 exclut les adaptations qui portent sur des éléments autres que les paramètres d'exécution. Cela étant, le Tableau-A V-5 propose les impacts relatifs des manœuvres sur les bancs d'essai.

Tableau-A V-5 Impacts relatifs des adaptations de l'algorithme mémétique sur les bancs d'essais

Rangée	Adaptation	Impacts relatifs (en %)		
		Cout total	Croisements	Phases de recherche
1	Retirer l'heuristique Augment-Merge	0,0342	-16,1	-8,70
2	Retirer 2 manœuvres de la recherche locale.	0,137	19,6	31,5
3	Fixer le nombre maximal de mutation à $0,95 \cdot T $	0	-1,34	1,09
4	Fixer p_{rl} à 1,38 %	0,120	22,5	34,8
5	Fixer n_{rd} à 1	0,26	S. O.	S. O.
6	Fixer $c_{p_{max}}$ à 5266 et $c_{np_{max}}$ à 1580	0,14	S. O.	S. O.
7	Tous les effets	2,95	S. O.	S. O.

Les impacts illustrés par le Tableau-A V-5 traitent des impacts sur l'ensemble des bancs d'essai. De plus, pour les ajustements des rangées 5, 6 et 7, les croisements et les phases de recherche sont omis. En effet, comme les paramètres portent sur le nombre de croisements et de phases de recherche, ils seront portés à être diminués. D'ailleurs, pour la probabilité de recherche locale p_{rl} (rangée 4), celle-ci est doublée lors d'une phase de recherche subséquente pour reproduire le comportement de Lacomme et al. (2004). Pour le même objectif, le nombre de croisements (rangée 6) est limité à 527 pour les phases subséquentes. Cela étant, l'utilisation de toutes ces adaptations augmente le temps total de 2,95 % pour tous les bancs d'essai, un effet limité. Néanmoins, le retrait de l'heuristique d'Augment-Merge (rangée 1) tend à

faiblement augmenter le cout total, mais à réduire considérablement le nombre de croisements et de phases de recherche. Ceci suggère que l'heuristique apportait un élément défavorable lors de l'exécution de l'AMém malgré les résultats favorables lors de la validation avec l'implémentation de Lacomme et al. (2004). Un effet similaire peut s'observer sur la fixation d'un nombre maximal de mutations (rangée 3). En effet, cette adaptation réduit également le nombre de croisements bien qu'elle augmente le nombre de phases de recherche. Cela suggère qu'une solution partiellement mutée pourrait constituer une approche intéressante.

ANNEXE VI

DONNÉES DES ITINÉRAIRES DES SCÉNARIOS DE DÉCENTRALISATION

Cette annexe complète les données présentées à la section 3.2.3 sur les itinéraires construits par l'algorithme mémétique (AMém). Elle propose de fournir les mêmes statistiques pour chacun des scénarios. Ainsi, chaque scénario est présenté en pair. Le premier tableau de la paire détaille les éléments retournés par l'AMém alors que le second propose les distances parcourues par itinéraires.

Tableau-A VI-1 Statistiques sur les itinéraires du premier scénario
(un centre de conditionnement)

Statistiques	Temps (h)	MR collectés (t)	Nombre de tronçon par itinéraire	Nombre de tronçons à collecter par itinéraire
Moyenne	1,79	8,24	209	63,9
Médiane	1,66	8,56	176	57,0
Écart-type	0,657	1,11	107	38,1
Minimum	0,163	0,895	15	3
Maximum	4,19	9,00	667	183

Tableau-A VI-2 Statistiques sur les distances parcourues
par itinéraires du premier scénario (un centre de conditionnement)

Statistiques	Distance absolues (km)			Distances relatives (%)	
	Total	Collecte	Transport	Collecte	Transport
Moyenne	21,1	8,04	13,1	39,1%	60,9
Médiane	18,3	6,94	11,8	38,8%	61,2
Écart-type	10,6	4,85	7,75	16,6%	16,6
Minimum	1,70	0,327	0,928	3,78%	23,1
Maximum	66,9	23,2	50,5	76,9%	96,2

Tableau-A VI-3 Statistiques sur les itinéraires du deuxième scénario
(deux centres de conditionnement)

Statistiques	Temps (h)	MR collectés (t)	Nombre de tronçons par itinéraire	Nombre de tronçons à collecter par itinéraire
Moyenne	1,80	8,30	205	64,4
Médiane	1,67	8,74	168	53,0
Écart-type	0,725	1,04	113	40,5
Minimum	0,648	3,66	34	3
Maximum	4,11	9,00	634	201

Tableau-A VI-4 Statistiques sur les distances parcourues
par itinéraires du deuxième scénario (deux centres de conditionnement)

Statistiques	Distance absolues (km)			Distances relatives (%)	
	Total	Collecte	Transport	Collecte	Transport
Moyenne	20,2	8,09	12,1	41,7	58,3
Médiane	16,4	6,87	10,5	41,7	58,3
Écart-type	12,0	5,21	8,39	16,8	16,8
Minimum	3,03	0,327	0,459	4,38	15,1
Maximum	73,9	26,8	56,3	84,9	95,6

Tableau-A VI-5 Statistiques sur les itinéraires du troisième scénario
(quatre centres de conditionnement)

Statistiques	Temps (h)	MR collectés (t)	Nombre de tronçons par itinéraire	Nombre de tronçons à collecter par itinéraire
Moyenne	1,74	8,24	179	63,9
Médiane	1,69	8,68	170	57,0
Écart-type	0,629	1,03	80,5	38,3
Minimum	0,518	4,09	28	3
Maximum	3,89	9,00	498	217

Tableau-A VI-6 Statistiques sur les distances parcourues par itinéraires du troisième scénario (quatre centres de conditionnement)

Statistiques	Distance absolues (km)			Distances relatives (%)	
	Total	Collecte	Transport	Collecte	Transport
Moyenne	18,6	8,04	10,6	42,5	57,5
Médiane	17,7	7,02	9,26	39,7	60,3
Écart-type	8,49	4,87	6,15	15,8	15,8
Minimum	3,85	0,327	1,44	8,49	19,6
Maximum	55,0	27,9	48,4	80,4	91,5

Tableau-A VI-7 Statistiques sur les itinéraires du quatrième scénario (sept centres de conditionnement)

Statistiques	Temps (h)	MR collectés (t)	Nombre de tronçons par itinéraire	Nombre de tronçons à collecter par itinéraire
Moyenne	1,76	8,24	192	63,9
Médiane	1,55	8,50	165	54,0
Écart-type	0,666	0,934	93,7	37,9
Minimum	0,797	3,03	56	3
Maximum	4,88	9,00	659	212

Tableau-A VI-8 Statistiques sur les distances parcourues par itinéraires du quatrième scénario (sept centres de conditionnement)

Statistiques	Distance absolues (km)			Distances relatives (%)	
	Total	Collecte	Transport	Collecte	Transport
Moyenne	19,5	8,04	11,5	42,2	57,8
Médiane	16,5	6,86	9,81	45,7	54,3
Écart-type	10,3	4,94	6,93	15,9	15,9
Minimum	6,52	0,327	0,721	3,83	11,1
Maximum	77,5	27,2	50,3	88,9	96,2

Tableau-A VI-9 Statistiques sur les itinéraires du cinquième scénario
(11 centres de conditionnement)

Statistiques	Temps (h)	MR collectés (t)	Nombre de tronçons par itinéraire	Nombre de tronçons à collecter par itinéraire
Moyenne	1,63	7,90	153	61,3
Médiane	1,55	8,49	144	54,5
Écart-type	0,701	1,42	83,9	38,9
Minimum	0,111	0,844	14	3
Maximum	3,75	8,99	537	197

Tableau-A VI-10 Statistiques sur les distances parcourues
par itinéraires du cinquième scénario (11 centres de conditionnement)

	Distance absolues (km)			Distances relatives (%)	
Statistiques	Total	Collecte	Transport	Collecte	Transport
Moyenne	15,6	7,71	7,90	50,0	50,0
Médiane	14,3	6,80	7,18	51,8	48,2
Écart-type	9,34	5,14	5,93	16,0	16,0
Minimum	0,942	0,368	0,221	9,51	9,22
Maximum	56,3	28,2	48,4	90,8	90,5

Tableau-A VI-11 Statistiques sur les itinéraires du sixième scénario
(19 centres de conditionnement)

Statistiques	Temps (h)	MR collectés (t)	Nombre de tronçons par itinéraire	Nombre de tronçons à collecter par itinéraire
Moyenne	1,48	7,34	129	57,0
Médiane	1,49	8,14	115	51,0
Écart-type	0,709	2,14	78,5	39,5
Minimum	0,0570	0,00323	6	1
Maximum	4,22	9,00	533	245

Tableau-A VI-12 Statistiques sur les distances parcourues
par itinéraires du sixième scénario (19 centres de conditionnement)

Statistiques	Distance absolues (km)			Distances relatives (%)	
	Total	Collecte	Transport	Collecte	Transport
Moyenne	13,1	7,17	5,89	54,9	45,1
Médiane	12,1	6,34	4,76	57,0	43,0
Écart-type	7,97	5,09	4,85	19,5	19,5
Minimum	0,794	0,0820	0,142	3,65	3,45
Maximum	52,2	33,8	42,8	96,5	96,3

ANNEXE VII

CARTOGRAPHIES DES GRAPPES D'ARRONDISSEMENT

Cette annexe complète visuellement les résultats sur le découpage spectral de la sous-section 3.3.1. Dans cette annexe, la Figure-A VII-1 à la Figure-A VII-4 présente chaque scénario, sauf le premier et le sixième. L'anomalie du cinquième scénario est également absente de la cartographie.

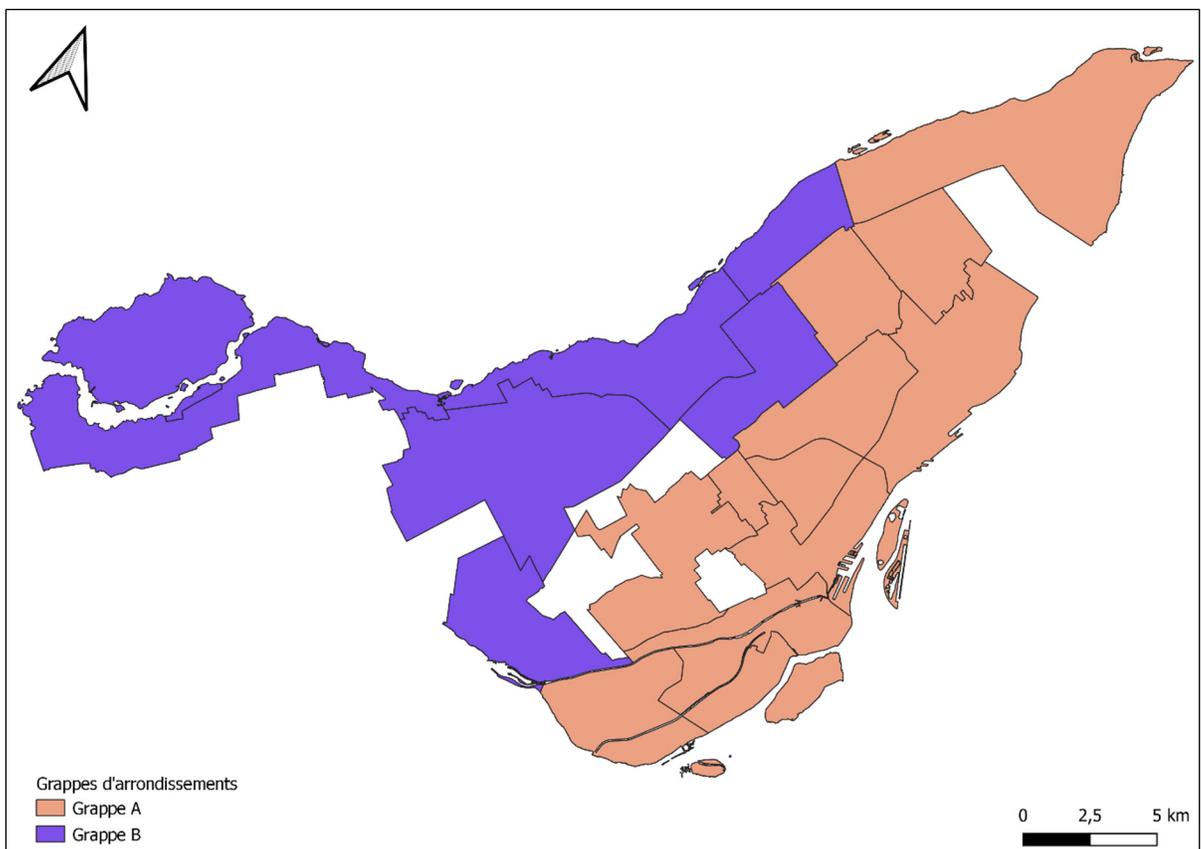


Figure-A VII-1 Cartographie des grappes d'arrondissement pour le deuxième scénario (deux centres déployés dans le territoire)

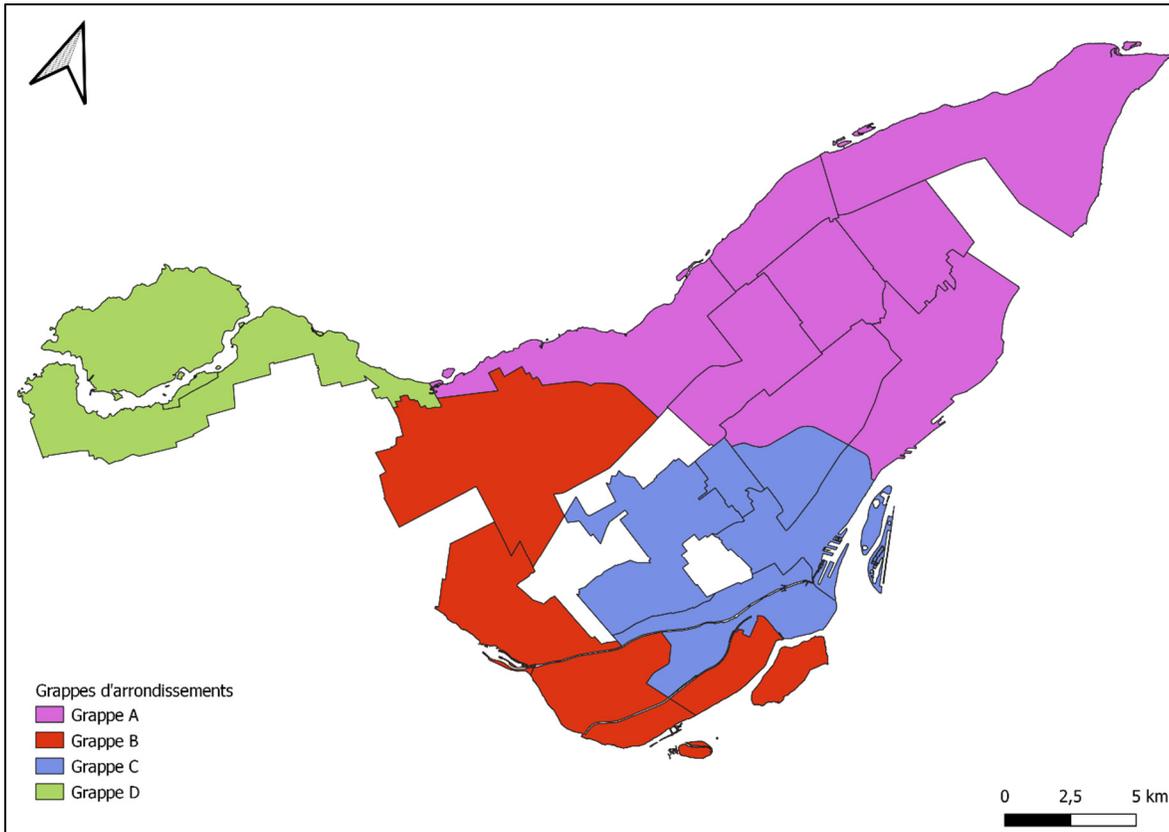


Figure-A VII-2 Cartographie des grappes d'arrondissement pour le troisième scénario (quatre centres déployés dans le territoire)

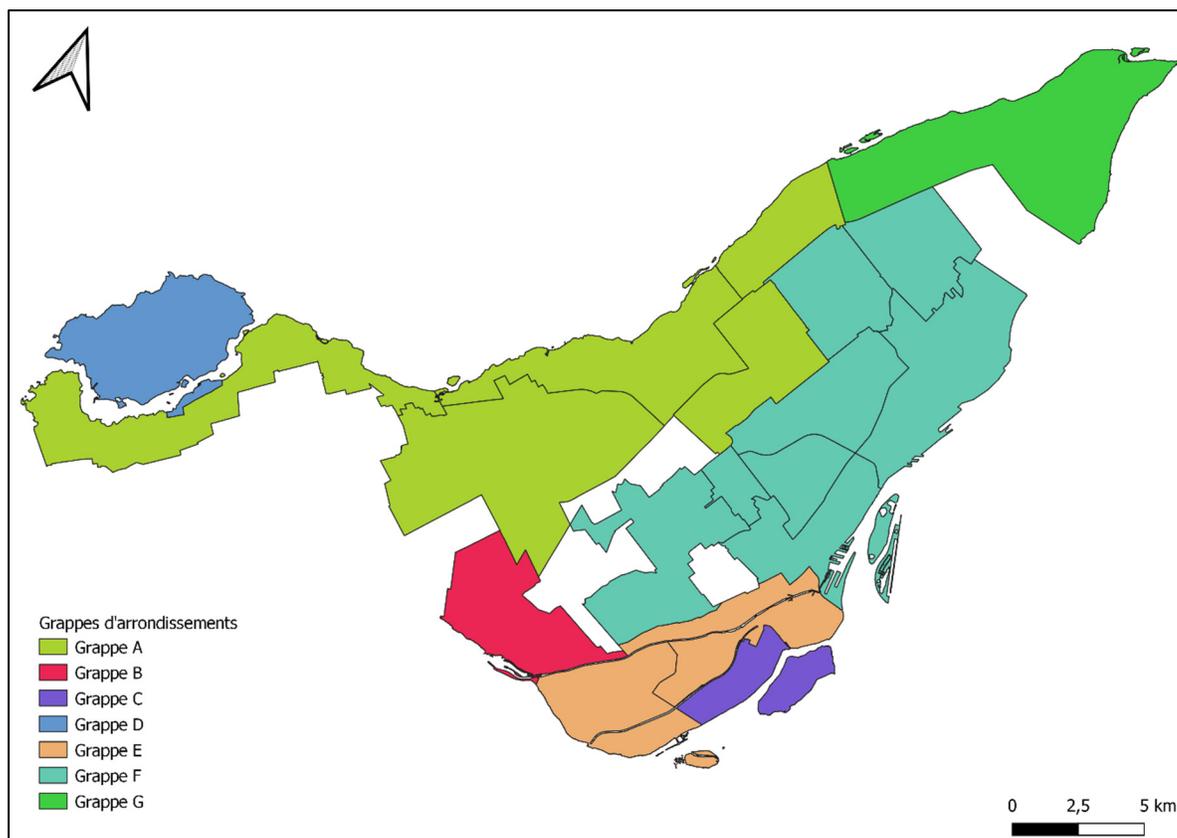


Figure-A VII-3 Cartographie des grappes d'arrondissement pour le quatrième scénario (sept centres déployés dans le territoire)

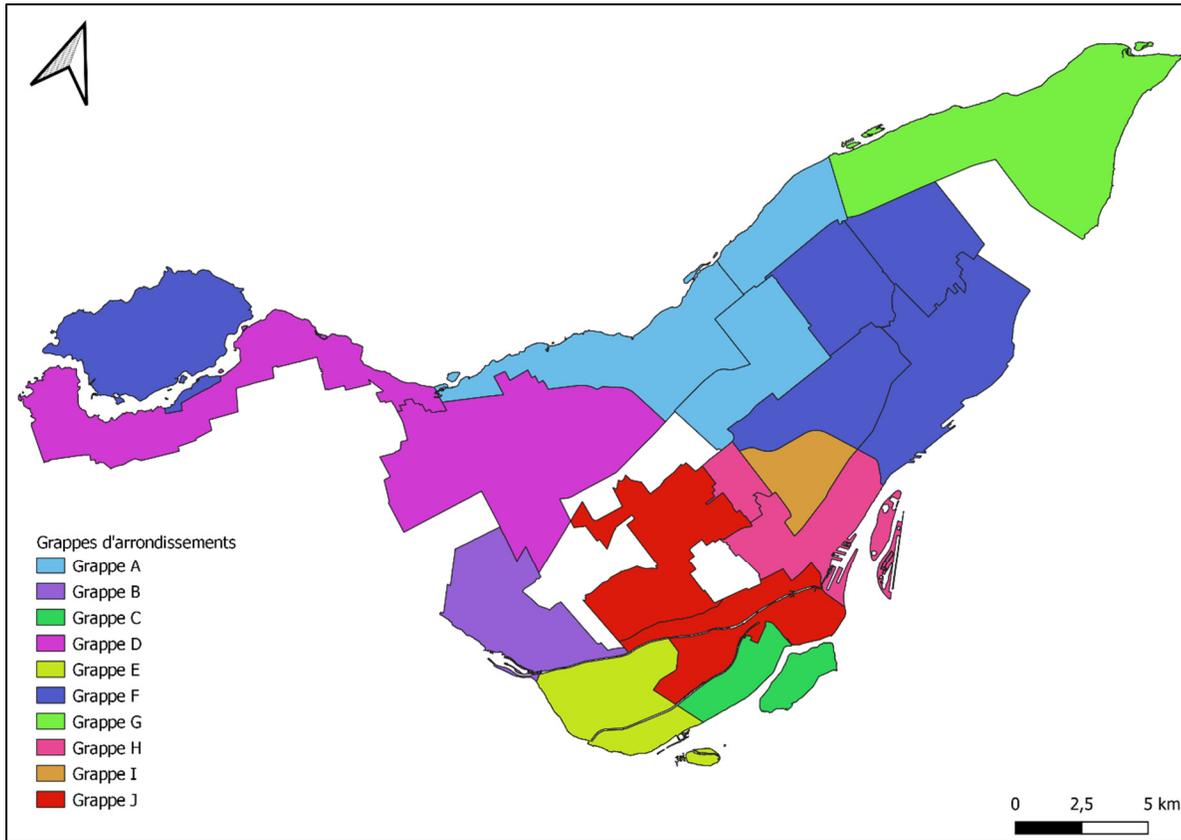


Figure-A VII-4 Cartographie des grappes d'arrondissement pour le cinquième scénario (11 centres déployés dans le territoire)

ANNEXE VIII

LOCALISATION DES CENTRES DE CONDITIONNEMENT SELON LE SCÉNARIO D'ÉTUDE

Pour compléter la section 3.3.1, cette annexe fournit l'adresse du centre de conditionnement pour chacun des scénarios, présentés du Tableau-A VIII-1 au Tableau-A VIII-7. Pour chacun de ces tableaux, l'arrondissement ou la grappe d'arrondissement est rapporté selon son code à trois lettres (Ville de Montréal, 2013d) avec son adresse et sa catégorie. Lorsqu'une adresse n'est pas offerte, des indications qui permettent de retrouver l'unité d'évaluation foncière sont décrites. L'arrondissement est omis pour le scénario de référence et le premier scénario, puisque ces derniers portent sur tout Montréal. Également, pour le scénario de référence, le centre de conditionnement est placé au Complexe environnemental de Saint-Michel, qui trie toutes les MRec montréalaises (Ville de Montréal, 2020).

Tableau-A VIII-1 Emplacement et catégories du centre de conditionnement du scénario de référence

Adresse	Catégorie
2535, rue Michel-Jurdant	Grand

Tableau-A VIII-2 Emplacement et taille du centre de conditionnement du premier scénario

Adresse	Catégorie
6545, rue Clark	Grand

Tableau-A VIII-3 Emplacements et catégories des centres de conditionnement du deuxième scénario

Grappe d'arrondissements	Adresse	Catégorie
AHU, IBI, MTN, PRF, VSE, VSL	11301, boulevard de l'Acadie	Moyen
ANJ, CDN, LAC, LAS, LSO, MHM, OUT, PLA, RDP, RPP, STL, VER, VIM	1145, avenue du Mont-Royal est	Grand

Tableau-A VIII-4 Emplacements et catégories des centres de conditionnements du troisième scénario

Grappe d'arrondissements	Adresse	Catégorie
IBI, PRF	4813, boulevard Saint-Jean	Petit
LAC, LAS, VER, VSL	4413, avenue Montclair	Moyen
CDN, LSO, OUT, PLA, VIM	1529, avenue Cedar	Grand
AHU, ANJ, MHM, MTN, RDP, RPP, STL, VSE	7600, boulevard Viau	Grand

Tableau-A VIII-5 Emplacements et catégories des centres de conditionnement du quatrième scénario

Grappe d'arrondissements	Adresse	Catégorie
IBI	Terrain non aménagé situé au côté gauche du tronçon 1622486 sur le boulevard Jacques-Bizard	Petit
AHU, MTN, PRF, VSE, VSL	Parc sur la rue Prieur ouest à proximité du tronçon 1030420	Moyen
LAC	2525, rue Provost	Petit
LAS, LSO	Terrain non aménagé situé à côté du 6391, rue Hurteau	Petit
VER	172, rue Willibrord	Petit
ANJ, CDN, MHM, OUT, PLA, RPP, STL, VIM	1695, avenue Laurier est	Grand
RDP	10705, boulevard Henri-Bourassa Est	Petit

Tableau-A VIII-6 Emplacements et catégories des centres de conditionnement du cinquième scénario

Grappe d'arrondissements	Adresse	Catégorie
IBI	Terrain non aménagé situé au côté gauche du tronçon 1622486 sur le boulevard Jacques-Bizard	Petit
PRF, VSL	7500, boulevard Thimens	Petit
LAC	2525, rue Provost	Petit
LAS	1475, boulevard Schevchenko	Petit
VRD	172, rue Willibrord	Petit
CDN, LSO	4120, avenue de Vendôme	Moyen
OUT, VIM	3475, avenue du Parc	Petit
PLA	Terrain non aménagé voisin au 4394, rue Rivard	Petit
AHU, MTN, VSE	1331, rue Chabanel est	Moyen
ANJ, MHM, RPP, STL	45345, rue Beaubien est	Moyen
RDP	10705, boulevard Henri-Bourassa Est	Petit

Tableau-A VIII-7 Emplacements et catégories des centres de conditionnement du sixième scénario

Grappe d'arrondissements	Adresse	Catégorie
AHU	10600, boulevard Saint-Laurent	Petit
ANJ	7751, boulevard Louis-H.-La Fontaine	Petit
CDN	Terrain de stationnement voisin au 5171, avenue Trans Island	Petit
IBI	Terrain non aménagé situé au côté gauche du tronçon 1622486 sur le boulevard Jacques-Bizard	Petit
LAS	1475, boulevard Schevchenko	Petit
LAC	2525, rue Provost	Petit
PLA	Terrain non aménagé voisin au 4394, rue Rivard	Petit
LSO	3507, rue Saint-Patrick	Petit
MHM	6100, avenue Pierre-de-Coubertin	Petit
MTN	5050, boulevard Henri-Bourassa est	Petit
OUT	603, avenue Stuart	Petit
PRF	Terrain non aménagé au coin d'Anselme-Lavigne et Richmond	Petit
RDP	10705, boulevard Henri-Bourassa est	Petit
RPP	6108, 8 ^e avenue	Petit
VSL	Stationnement voisin au 1705, rue Tassé	Petit
STL	8125, rue Collerette	Petit
VER	172, rue Willibrord	Petit
VIM	105, rue Sainte-Catherine Ouest	Petit
VSE	1366, rue Jarry	Petit

ANNEXE IX

DONNÉES DES PERFORMANCES POUR L'ENSEMBLE DES SCÉNARIOS DE DÉCENTRALISATION

Cette annexe propose de fournir les données absolues, comme présentées à la sous-section 3.3.2, pour compléter l'analyse de la décentralisation. L'annexe présente d'abord les différents indicateurs : émissions de CO₂, coûts totaux. Elle présente ensuite la consommation de carburant pour chaque scénario. Puis, elle reprend les tableaux de la sous-section 3.2.3 et les présente en paires pour chaque scénario de décentralisation. Le premier tableau présente donc les polluants et la consommation de carburant alors que le second présente plutôt les coûts associés. En guise de rappel, les coûts annuels omettent les variations mensuelles de MRec. Un dernier tableau présente les distances post-tri.

Tableau-A IX-1 Indicateurs de performance
selon le scénario

Scénario (nombre de centres dans le sous-territoire)	Émissions de CO₂ totales (t)	Coûts totaux (\$)
1	3,82	120 000
2	3,65	157 000
3	3,59	208 000
4	3,51	242 000
6	3,19	306 000
13	3,04	621 000

Tableau-A IX-2 Consommation de carburant selon le scénario

Numéro de scénario	Nombre de centres déployés (sous-territoire)	Consommation de carburant (L/100 km)
Référence	1	45,8
1	1	46,9
2	2	48,1
3	3	49,3
4	4	48,3
5	6	52,3
6	13	54,0

Tableau-A IX-3 Émissions des différents polluants et consommation de carburant pour le premier scénario (un centre de conditionnement dans le sous-territoire)

Catégorie	Collecte		Transport		Transport post-tri	
	abs.	%	abs.	%	abs.	%
Émissions de CO ₂ (kg)	2200	60,2	1430	39,2	21,2	0,581
Émissions de CO (kg)	12,8	68,4	5,82	31,1	0,0902	0,482
Émissions de PM (kg)	2,44	68,5	1,10	31,0	0,0164	0,461
Émissions de HC (kg)	8,44	74,7	2,83	25,0	0,0376	0,332
Consommation de carburant (L)	844	60,5	544	39,0	8,06	0,578

Tableau-A IX-4 Coûts associés au premier scénario (un centre de conditionnement dans le sous-territoire)

Catégorie de coûts	Montant hebdomadaire (\$)	Montant annuel (k\$)	Part relative (%)
Collecte et transport	22 400	1160	18,7
Tri	46 900	2440	39,0
Transport post-tri	48,7	2,53	0,0405
Investissement	50 900	2650	42,3

Total	120 000	6260	100
-------	---------	------	-----

Tableau-A IX-5 Émissions des différents polluants
et consommation de carburant pour le deuxième scénario
(deux centres de conditionnement dans le sous-territoire)

Catégorie	Collecte		Transport		Transport post-tri	
	abs.	%	abs.	%	abs.	%
Émissions de CO ₂ (kg)	2200	61,3	1356	37,8	33,9	0,946
Émissions de CO (kg)	12,8	69,3	5,52	29,9	0,147	0,795
Émissions de PM (kg)	2,44	69,4	1,05	29,9	0,0264	0,751
Émissions de HC (kg)	8,44	75,1	2,74	24,4	0,0636	0,566
Consommation de carburant (L)	843	61,5	515	37,6	12,9	0,940

Tableau-A IX-6 Coûts associés au deuxième scénario
(deux centres de conditionnement dans le sous-territoire)

Catégorie de coûts	Montant hebdomadaire (\$)	Montant annuel (k\$)	Part relative (%)
Collecte et transport	22 323	1160	14,2
Tri	46 857	2440	29,8
Transport post-tri	83,0	4,32	0,0528
Investissement	88 040	4580	56,0
Total	157 303	8180	100

Tableau-A IX-7 Émissions des différents polluants
et consommation de carburant pour le troisième scénario
(trois centres de conditionnement dans le sous-territoire)

Catégorie	Collecte		Transport		Transport post-tri	
	abs.	%	abs.	%	abs.	%
Émissions de CO ₂ (kg)	2200	65,1	1162	34,3	20,3	0,600
Émissions de CO (kg)	12,8	72,7	4,73	26,8	0,0869	0,493
Émissions de PM (kg)	2,44	72,8	0,897	26,7	0,0157	0,469

Émissions de HC (kg)	8,44	78,2	2,31	21,4	0,0369	0,342
Consommation de carburant (L)	845	65,3	442	34,1	7,71	0,596

Tableau-A IX-8 Coûts associés au troisième scénario
(trois centres de conditionnement dans le sous-territoire)

Catégorie de coûts	Montant hebdomadaire (\$)	Montant annuel (k\$)	Part relative (%)
Collecte et transport	21 697	1130	10,5
Tri	46 874	2440	22,6
Transport post-tri	47,6	2,48	0,0230
Investissement	138 980	7240	66,9
Total	207 599	10 800	100

Tableau-A IX-9 Émissions des différents polluants
et consommation de carburant pour le quatrième scénario
(quatre centres de conditionnement dans le sous-territoire)

Catégorie	Collecte		Transport		Transport post-tri	
	abs.	%	abs.	%	abs.	%
Émissions de CO ₂ (kg)	2200	62,8	1269	36,2	35,6	1,01
Émissions de CO (kg)	12,8	70,6	5,16	28,5	0,158	0,874
Émissions de PM (kg)	2,44	70,8	0,980	28,4	0,0280	0,811
Émissions de HC (kg)	8,44	76,5	2,53	22,9	0,0692	0,627
Consommation de carburant (L)	845	63,0	483	36,0	13,5	1,01

Tableau-A IX-10 Coûts associés au quatrième scénario
(quatre centres de conditionnement dans le sous-territoire)

Catégorie de coûts	Montant hebdomadaire (\$)	Montant annuel (k\$)	Part relative (%)
Collecte et transport	22 011	1140	9,08
Tri	46 643	2430	19,2
Transport post-tri	88,0	4,57	0,0363

Investissement	173 730	9030	71,6
Total	242 742	12 600	100

Tableau-A IX-11 Émissions des différents polluants
et consommation de carburant pour le cinquième scénario
(six centres de conditionnement dans le sous-territoire)

Catégorie	Collecte		Transport		Transport post-tri	
	abs.	%	abs.	%	abs.	%
Émissions de CO ₂ (kg)	2200	69,0	946	29,7	42,5	1,33
Émissions de CO (kg)	12,8	76,0	3,86	22,9	0,192	1,14
Émissions de PM (kg)	2,44	76,0	0,737	22,9	0,0336	1,05
Émissions de HC (kg)	8,45	80,6	1,95	18,6	0,0856	0,817
Consommation de carburant (L)	844	69,2	360	29,5	16,2	1,32

Tableau-A IX-12 Coûts associés au cinquième scénario
(six centres de conditionnement dans le sous-territoire)

Catégorie de coûts	Montant hebdomadaire (\$)	Montant annuel (k\$)	Part relative (%)
Collecte et transport	21 187	1100	6,92
Tri	44 555	2320	14,6
Transport post-tri	514	26,7	0,168
Investissement	239 836	12 400	78,4
Total	306 091	16 000	100

Tableau-A IX-13 Émissions des différents polluants
et consommation de carburant pour le sixième scénario
(treize centres de conditionnement dans le sous-territoire)

Catégorie	Collecte		Transport		Transport post-tri	
	abs.	%	abs.	%	abs.	%
Émissions de CO ₂ (kg)	2200	72,3	762	25,0	80,0	2,63
Émissions de CO (kg)	12,9	78,7	3,12	19,1	0,370	2,26

Émissions de PM (kg)	2,44	78,8	0,595	19,2	0,0638	2,05
Émissions de HC (kg)	8,47	82,8	1,59	15,6	0,168	1,65
Consommation de carburant (L)	844	72,5	290	24,9	30,4	2,61

Tableau-A IX-14 Coûts associés au sixième scénario
(treize centres de conditionnement dans le sous-territoire)

Catégorie de coûts	Montant hebdomadaire (\$)	Montant annuel (k\$)	Part relative (%)
Collecte et transport	20 670	1070	3,33
Tri	43 299	2250	6,97
Transport post-tri	212	11,0	0,0341
Investissement	556 982	29 000	89,7
Total	621 163	32 300	100

Tableau-A IX-15 Distances de transport
post-tri selon le scénario
de décentralisation

Numéro de scénario	Distances de transport post-tri (km)
Référence	18,5
1	24,8
2	42,8
4	23,3
7	45,1
11	54,2
19	108

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdallah, M., Hamdan, S., & Shabib, A. (2021). A multi-objective optimization model for strategic waste management master plans. *Journal of Cleaner Production*, 284, 124714. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124714>
- ADEME. (2018). Le prétraitement, souvent indispensable à la valorisation des déchets. *ADEME*. Repéré à <https://www.ademe.fr/expertises/dechets/quoi-parle-t/prevention-gestion-dechets/pretraitement-souvent-indispensable-a-valorisation-dechets>
- ADEME, Devauze, C., Koite, A., Chretien, A., & Monier, V. (2022). *Bilan National du Recyclage 2010-2019 - Évolutions du recyclage en France de différents matériaux : métaux ferreux et non ferreux, papiers-cartons, verre, plastiques, inertes du BTP et bois*. Repéré à https://librairie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/5233-bilan-national-du-recyclage-bnr-2010-2019.html#/44-type_de_produit-format_electronique
- Aggarwal, C. C. (2014). An Introduction to Cluster Analysis. Dans *Data Clustering*. (S.l.) : Chapman and Hall/CRC.
- Ahani, M., Arjmandi, R., Hoveidi, H., Ghodousi, J., & Miri Lavasani, M. R. (2019). A multi-objective optimization model for municipal waste management system in Tehran city, Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(10), 5447-5462. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02335-1>
- Al-Jubori, K., & Gazder, U. (2018). Framework for route optimization of solid waste collection. Dans *Smart Cities Symposium 2018, April 22, 2018 - April 23, 2018* (Vol. 2018). Bahrain, Bahrain : Institution of Engineering and Technology. <https://doi.org/10.1049/cp.2018.1407>
- Aloise, D., Deshpande, A., Hansen, P., & Popat, P. (2009). NP-hardness of Euclidean sum-of-squares clustering. *Machine Learning*, 75(2), 245-248. <https://doi.org/10.1007/s10994-009-5103-0>
- Arthur, D., & Vassilvitskii, S. (2007). k-means++: the advantages of careful seeding. Dans *Proceedings of the eighteenth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms* (pp. 1027-1035). USA : Society for Industrial and Applied Mathematics.

- Aziz, H. A., & Abu Amr, S. S. (2020). Introduction to Solid Waste and Its Management. Dans Information Resources Management Association (Éd.), *Waste Management - Concepts, Methodologies, Tools, and Applications* (pp. 1-24). (S.l.) : IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-1210-4.ch001>
- Baky, A., & Eriksson, O. (2003). *Systems Analysis of Organic Waste Mangement in Denmark: Environmental Project No. 822 2003 Miljøprojekt*. Danemark : Danish Environmental Protection Agency. Repéré à <https://scholar.google.com/scholar?q=Baky,%20A.,%20Eriksson,%20O.,%202003.%20System%20analysis%20of%20organic%20waste%20management%20in%20Denmark.%20Environmental%20Project%20822.%20www.miljoindflydelse.dk%20accesse%2019.07.08>.
- Bass, L., Clements, P., & Kazman, R. (2012). *Software Architecture in Practice* (3e éd.). (S.l.) : Addison Wesley.
- Batur, M. E., Cihan, A., Korucu, M. K., Bektaş, N., & Keskinler, B. (2020). A mixed integer linear programming model for long-term planning of municipal solid waste management systems: Against restricted mass balances. *Waste Management*, 105, 211-222. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.02.003>
- Belenguer, J. M., & Benavent, E. (2003a). A cutting plane algorithm for the capacitated arc routing problem. *Computers & Operations Research*, 30(5), 705-728. [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(02\)00046-1](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(02)00046-1)
- Belenguer, J. M., & Benavent, E. (2003b). The Capacitated Arc Routing Problem. [Jeu de données]. Repéré à <https://www.uv.es/belengue/carp.html>
- Bourque, C. (2010). Les résidus domestiques dangereux. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/Fiche-info-rdd.pdf>
- Bureau d'audiences publiques sur l'environnement. (1997). *Déchets d'hier, ressources de demain* (Rapport No. 115). Québec. Repéré à <https://www.bape.gouv.qc.ca/fr/dossiers/dechets-hier-ressources-demain/>
- 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>
- Chang, N.-B., & Pires, A. (2015). *Sustainable Solid Waste Management: A Systems Engineering Approach*. (S.l.) : IEEE Press. Repéré à <https://ieeexplore.ieee.org/book/7061011>
- Chen, S., Golden, B., Wong, R., & Zhong, H. (2009). Arc-Routing Models for Small-Package Local Routing. *Transportation Science*, 43(1), 43-55. <https://doi.org/10.1287/trsc.1080.0255>
- Cheniti, H., Cheniti, M., & Brahamia, K. (2021). Use of GIS and Moran's I to support residential solid waste recycling in the city of Annaba, Algeria. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(26), 34027-34041. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10911-z>
- Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail. (s.d.). Heures supplémentaires. *CNESST*. Repéré à <https://www.cnesst.gouv.qc.ca/fr/conditions-travail/salaire-paye/salaire/heures-supplementaires>
- Communauté métropolitaine de Montréal. (2012). *Plan métropolitain d'aménagement et de développement*. Repéré à <https://cmm.qc.ca/planification/plan-metropolitain-damenagement-et-de-developpement-pmad/>
- Corbo, R., & Glaus, M. (2019). Design of material transportation systems for sustainability. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 75, 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.08.014>
- Cormen, T. H. (2009). *Introduction to algorithms* (Third edition). Cambridge, Mass. : MIT Press. Repéré à <http://www.books24x7.com/marc.asp?bookid=49924>
- Dai, F., Nie, G., & Chen, Y. (2020). The municipal solid waste generation distribution prediction system based on FIG-GA-SVR model. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22(5), 1352-1369. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01022-5>
- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1), 269-271. <https://doi.org/10.1007/BF01386390>

- Doré, G. (2021). De nouveaux lieux d'innovation en France à travers la mutualisation de services. *Revue Organisations & territoires*, 30(2), 141-157. <https://doi.org/10.1522/revueot.v30n2.1358>
- Dorigo, M., Maniezzo, V., & Colorni, A. (1996). The Ant System: Optimization by a colony of cooperation agents. *IEEE Transaction on System, Man, and Cybernetics*, 26(1), 13.
- Duzgun, H. S., Uskay, S. O., & Aksoy, A. (2016). Parallel Hybrid Genetic Algorithm and GIS-Based Optimization for Municipal Solid Waste Collection Routing. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 30(3), 04015037 (9 pp.). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000502](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000502)
- Éco Entreprises Québec & RECYC-QUÉBEC. (2016). *Allocation des coûts par activité - Résultats 2016*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/allocation-couts-activite-2016.pdf>
- Éco Entreprises Québec & RECYC-QUÉBEC. (2020). *Caractérisation des matières sortantes des centres de tri*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/caracterisation-matieres-sortantes-centres-de-tri-2018-2020.pdf>
- Éco Entreprises Québec & RECYC-QUÉBEC. (2021). *Caractérisation des matières résiduelles du secteur municipal 2015-2018*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/caracterisation-secteur-municipal-2015-2018.pdf>
- Eglese, R. W. (1994). Routeing winter gritting vehicles. *Discrete Applied Mathematics*, 48(3), 231-244. [https://doi.org/10.1016/0166-218X\(92\)00003-5](https://doi.org/10.1016/0166-218X(92)00003-5)
- Eiben, A. E., & Smit, S. K. (2011). Parameter tuning for configuring and analyzing evolutionary algorithms. *Swarm and Evolutionary Computation*, 1(1), 19-31. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2011.02.001>
- Elefante, C. (2007). The Greenest Building Is...One That Is Already Built. *Forum Journal: The Journal of the National Trust for Historic Preservation*, 21(4), 26-38.
- Énergie et Ressources naturelles. (2019). Facteurs d'émission et de conversion. Repéré à <http://www.transitionenergetique.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/FacteursEmission.pdf>

- Environnement et Changement climatique Canada. (2007). Gestion et réduction des déchets : aperçu. [résultats de programmes]. Repéré à <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/gestion-reduction-dechets/aperçu.html>
- ESRI. (s.d.-a). Esri Support GIS Dictionary. Repéré à <https://support.esri.com/en/other-resources/gis-dictionary/term/5d54a903-1839-4687-bb77-92441e72a209>
- ESRI. (s.d.-b). Fonctionnement de l’outil Centre moyen - ArcGis Pro | Documentation. Repéré à <https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/latest/tool-reference/spatial-statistics/h-how-mean-center-spatial-statistics-works.htm>
- Everett, J. W., Maratha, S., Dorairaj, R., & Riley, P. (1998). Curbside collection of recyclables I: route time estimation model. *Resources, Conservation and Recycling*, 22(3), 177-192. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(98\)00008-1](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(98)00008-1)
- Franco González, J., Gallardo Izquierdo, A., Commans, F., & Carlos, M. (2021). Fuel-efficient driving in the context of urban waste-collection: A Spanish case study. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125831. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125831>
- Golden, B. L., Dearmon, J. S., & Baker, E. K. (1983). Computational experiments with algorithms for a class of routing problems. *Computers & Operations Research*, 10(1), 47-59. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(83\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0305-0548(83)90026-6)
- Gouvernement du Québec. *Loi sur la qualité de l’environnement* (RLRQ c Q-2) (2021). Repéré à <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cs/Q-2>
- Guérin-Schneider, L., Tsanga-Tabi, M., Roux, P., Catel, L., & Biard, Y. (2018). How to better include environmental assessment in public decision-making: Lessons from the use of an LCA-calculator for wastewater systems. *Journal of Cleaner Production*, 187, 1057-1068. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.168>
- Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., ... Oliphant, T. E. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585(7825), 357-362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
- Hausler, R. (1999). L’enfouissement à l’aube de l’an 2000: un maillon important dans la chaîne des résidus. Communication présentée au Americana.

- Höke, M. C., & Yalcinkaya, S. (2021). Municipal solid waste transfer station planning through vehicle routing problem-based scenario analysis. *Waste Management & Research*, 39(1), 185-196. <https://doi.org/10.1177/0734242X20966643>
- Hoorweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). *What a Waste : A Global Review of Solid Waste Management*. Washington, DC : World Bank. Repéré à <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/17388>
- Jaunich, M. K., Levis, J. W., DeCarolis, J. F., Gaston, E. V., Barlaz, M. A., Bartelt-Hunt, S. L., ... Jaikumar, R. (2016). Characterization of municipal solid waste collection operations. *Resources, Conservation and Recycling*, 114, 92-102. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.07.012>
- Johnstone, N., & Labonne, J. (2004). Generation of Household Solid Waste in OECD Countries: An Empirical Analysis Using Macroeconomic Data. *Land Economics*, 80(4), 529-538. <https://doi.org/10.2307/3655808>
- Jordahl, K., Bossche, J. V. den, Fleischmann, M., McBride, J., Wasserman, J., Richards, M., ... Wasser, L. (2022). *geopandas/geopandas: v0.11.1*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6894736>
- Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington, DC : World Bank. (Accepted: 2018-08-31T16:25:22Z). <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 220(4598), 10.
- Kuznetsova, E., Cardin, M.-A., Diao, M., & Zhang, S. (2019). Integrated decision-support methodology for combined centralized-decentralized waste-to-energy management systems design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103, 477-500. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.020>
- Labelle, A., Langevin, A., & Campbell, J. F. (2002). Sector design for snow removal and disposal in urban areas. *Socio-Economic Planning Sciences*, 36(3), 183-202. [https://doi.org/10.1016/S0038-0121\(01\)00024-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0121(01)00024-6)

- Lacomme, P., Prins, C., & Ramdane-Cherif, W. (2004). Competitive Memetic Algorithms for Arc Routing Problems. *Annals of Operations Research*, 131(1), 159-185. <https://doi.org/10.1023/B:ANOR.0000039517.35989.6d>
- Laguna, M. (2018). Tabu Search. Dans R. Martí, P. M. Pardalos, & M. G. C. Resende (Éds), *Handbook of Heuristics* (pp. 741-758). Cham : Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07124-4_24
- Laguna, M., & Martí, R. (2013). Heuristics. Dans S. I. Gass & M. C. Fu (Éds), *Encyclopedia of Operations Research and Management Science* (pp. 695-703). Boston, MA : Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1153-7_1184
- Langlois-Blouin, S., Fontaine, C. I., Boies, M., & Turgeon, N. (2021). *Diagnostic des centres de tri du Québec* (Rapport No. 60193-R2). Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/rapport-cric-diagnostic-centres-de-tri.pdf>
- Lavergne, Inc. (2019). Contactez-nous. Repéré à <https://lavergne.ca/fr/>
- Leonard, B. (2003). *Solid Waste Management and Greenhouse Gases: A Life-Cycle Assessment of Emissions and Sinks*. (S.l.) : DIANE Publishing. (Google-Books-ID: oVLOgRbAsJwC).
- Liu, J., & Han, J. (2014). Spectral Clustering. Dans *Data Clustering*. (S.l.) : Chapman and Hall/CRC.
- Lou, X. F., & Nair, J. (2009). The impact of landfilling and composting on greenhouse gas emissions – A review. *Bioresource Technology*, 100(16), 3792-3798. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.006>
- Loubert, A. (2022). *Évaluation de l'effet de la spatialité sur la performance environnementale du recyclage des bouteilles de PET*. Mémoire de maîtrise. École de technologie supérieure. Repéré à <https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/3137/>
- Ma, Y., Zhang, W., Feng, C., Lev, B., & Li, Z. (2021). A bi-level multi-objective location-routing model for municipal waste management with obnoxious effects. *Waste Management*, 135, 109-121. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.08.034>

- Madden, B., Florin, N., Mohr, S., & Giurco, D. (2021). Spatial modelling of municipal waste generation: Deriving property lot estimates with limited data. *Resources, Conservation and Recycling*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105442>
- Mavrotas, G., Gakis, N., Skoulaxinou, S., Katsouros, V., & Georgopoulou, E. (2015). Municipal solid waste management and energy production: Consideration of external cost through multi-objective optimization and its effect on waste-to-energy solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1205-1222. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.029>
- Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation. (2018). Codes d'utilisation des biens-fonds. Repéré à <https://www.mamh.gouv.qc.ca/evaluation-fonciere/manuel-devaluation-fonciere-du-quebec/codes-dutilisation-des-biens-fonds/>
- Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation. (2021). *Rapport du Ministère des affaires municipales et de l'habitation présenté à la commission d'enquête sur l'état des lieux et la gestion des résidus ultimes* (Rapport No. 6212- 03-124). Repéré à <https://voute.bape.gouv.qc.ca/dl/?id=00000235537>
- Montréal en statistiques. (2019). *Annuaire statistique 2016 de l'agglomération de Montréal*. Montréal. Repéré à ville.montreal.qc.ca/pls/portal/url/ITEM/888AA62B4D34D0E8E0530A930132D0E8
- Montréal en statistiques. (2022). *Annuaire statistique de l'agglomération de Montréal - 2021*. [Jeu de données], Ville de Montréal. Repéré à https://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=6897,68149701&_dad=portal&_schema=PORTAL
- Morency, C., Verreault, H., & Demers, M. (2015). Identification of the minimum size of the shared-car fleet required to satisfy car-driving trips in Montreal. *Transportation*, 42(3), 435-447. <https://doi.org/10.1007/s11116-015-9605-2>
- Moscato, P., & Fontanari, J. F. (1990). Stochastic versus deterministic update in simulated annealing. *Physics Letters A*, 146(4), 204-208. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(90\)90166-L](https://doi.org/10.1016/0375-9601(90)90166-L)
- MRC des Pays-d'en-Haut. (2021). Le troisième des 5 R : Réutiliser. *MRC des Pays-d'en-Haut*. Repéré à <https://lespaysdenhaut.com/le-troisieme-des-5-r-reutiliser/>

- Nguyen, T. T. T., & Wilson, B. G. (2010). Fuel consumption estimation for kerbside municipal solid waste (MSW) collection activities. *Waste Management & Research*, 28(4), 289-297. <https://doi.org/10.1177/0734242X09337656>
- Nikas, A., Xexakis, G., Koasidis, K., Acosta-Fernández, J., Arto, I., Calzadilla, A., ... Doukas, H. (2022). Coupling circularity performance and climate action: From disciplinary silos to transdisciplinary modelling science. *Sustainable Production and Consumption*, 30, 269-277. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.12.011>
- Nowakowski, P., Król, A., & Mrówczyńska, B. (2017). Supporting mobile WEEE collection on demand: A method for multi-criteria vehicle routing, loading and cost optimisation. *Waste Management*, 69, 377-392. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.045>
- Office de la consultation publique de Montréal. (2012). *Centres de traitement des matières organiques*. Montréal. Repéré à <https://ocpm.qc.ca/fr/consultation-publique/traitement-matieres-organiques>
- Office de la consultation publique de Montréal. (2015). *Centre de traitement des matières organiques - Secteur EST - RDP-PAT*. Montréal. Repéré à <https://ocpm.qc.ca/fr/consultation-publique/implantation-dun-centre-compostage-dans-secteur-est>
- Office québécois de la langue française. (2022). La Vitrine linguistique de l'Office québécois de la langue française. Repéré à <https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/>
- OpenJS Foundation & Node.js contributors. (2020). Node.js. [C++]. Repéré à <https://nodejs.org/en/>
- Orloff, C. S. (1974). A Fundamental Problem in Vehicle Routing. *Networks*, (4), 35-64.
- Peter, P. (2011). *Introduction to Parallel Programming*. (S.l.): Elsevier. Repéré à https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpIPP00004/viewerType:toc//root_slug:introduction-to-parallel?kpromoter=marc
- Poulin, O., Bouzenot, J., & Cartoux, A. (2021). *La collecte des déchets par le service public en France en 2019 : résultats clés et zooms thématiques*. Repéré à <https://librairie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/4804-la-collecte-des-dechets-par-le-service-public-en-france.html>

- Pourreza Movahed, Z., Kabiri, M., Ranjbar, S., & Joda, F. (2020). Multi-objective optimization of life cycle assessment of integrated waste management based on genetic algorithms: A case study of Tehran. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119153. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119153>
- Purvis, B., Mao, Y., & Robinson, D. (2019). Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins. *Sustainability Science*, 14(3), 681-695. <https://doi.org/10.1007/s11625-018-0627-5>
- Python Software Foundation. (2019). Python. [Python]. Repéré à <https://www.python.org/>
- QGIS Development Team. (2021). QGIS Geographic Information System. QGIS Association. Repéré à <https://qgis.org>
- Rahman, Md. S. (2017). Basic Graph Terminologies. Dans Md. S. Rahman (Éd.), *Basic Graph Theory* (pp. 11-29). Cham : Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49475-3_2
- RECYC-QUÉBEC. (2009). *Portrait de la gestion des matières résiduelles dans le sous-secteur institutionnel au Québec*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/portrait-gmr-ici-04-09.pdf>
- RECYC-QUÉBEC. (2020). *Bilan 2018 de la gestion des matières résiduelles au Québec*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/bilan-gmr-2018-complet.pdf>
- RECYC-QUÉBEC. (2021). Québec sans gaspillage | Économie circulaire pour citoyens. Repéré à <https://economiecirculaire.recyc-quebec.gouv.qc.ca/>
- RECYC-QUÉBEC. (s.d.-a). Biométhanisation sur place. *RECYC-QUÉBEC*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/entreprises-organismes/matieres-organiques/scenarios-gestion-entreprise/biomethanisation-sur-place>
- RECYC-QUÉBEC. (s.d.-b). Ça va où? Repéré à <https://cavaouwebapp.recyc-quebec.gouv.qc.ca/>
- RECYC-QUÉBEC. (s.d.-c). Lexique. *RECYC-QUÉBEC*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/haut-de-page/lexique>

- Rhyner, C. R. (1992). Monthly Variations in Solid Generation. *Waste Management & Research*, 10(1), 67-71. <https://doi.org/10.1177/0734242X9201000107>
- Richter, A., Ng, K. T. W., & Karimi, N. (2021). Meshing Centroidal Voronoi Tessellation with spatial statistics to optimize waste management regions. *Journal of Cleaner Production*, 295, 126465. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126465>
- Rujo, G. (2009). *La gestion dynamique des déchets (GDD) : élaboration d'une approche intégrée d'aide à la décision visant à soutenir une gestion systémique et évolutive des déchets*. phd. École de technologie supérieure, Montréal. Repéré à <https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/78/>
- Russo, S., & Verda, V. (2020). Influencing factors of Solid Waste Management global cost and efficiency: a multi-objective optimization focusing on the collection system. *E3S Web of Conferences*, 197, 12001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019712001>
- Salhi, S., & Rand, G. K. (1989). The effect of ignoring routes when locating depots. *European Journal of Operational Research*, 39(2), 150-156. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(89\)90188-4](https://doi.org/10.1016/0377-2217(89)90188-4)
- Sivanandam, S. N., & Deepa, S. N. (2007). *Introduction to genetic algorithms*. Berlin ; : Springer. Repéré à <http://www.books24x7.com/marc.asp?bookid=30967>
- Sörensen, K., & Glover, F. W. (2013). Metaheuristics. Dans S. I. Gass & M. C. Fu (Éds), *Encyclopedia of Operations Research and Management Science* (pp. 960-970). Boston, MA : Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1153-7_1167
- Speight, J. G. (2011). 2 - Production, properties and environmental impact of hydrocarbon fuel conversion. Dans M. R. Khan (Éd.), *Advances in Clean Hydrocarbon Fuel Processing* (pp. 54-82). (S.l.) : Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857093783.1.54>
- Steuer, R. E. (2013). Multiobjective Programming. Dans S. I. Gass & M. C. Fu (Éds), *Encyclopedia of Operations Research and Management Science* (pp. 996-1003). Boston, MA : Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1153-7_652
- Strang, G. (2019). 35. Finding Clusters in Graphs. [Vidéo en ligne]. Repéré à <https://www.youtube.com/watch?v=cxTmmasBiC8>

- Sun, S., & Ertz, M. (2021). Contribution of bike-sharing to urban resource conservation: The case of free-floating bike-sharing. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124416. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124416>
- Szwarc, K., Nowakowski, P., & Boryczka, U. (2021). An evolutionary approach to the vehicle route planning in e-waste mobile collection on demand. *Soft Computing*, 25(8), 6665-6680. <https://doi.org/10.1007/s00500-021-05665-w>
- Tanguy, A., Glaus, M., Laforest, V., Villot, J., & Hausler, R. (2016). A spatial analysis of hierarchical waste transport structures under growing demand. *Waste Management & Research*, 34(10), 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>
- Transport Research Laboratory, Hickman, J., Hassel, D., Joumard, R., Samaras, Z., & Sorenson, S. (1999). *Methodology for Calculating Transport Emissions and Energy Consumption* (Rapport No. SE/491/98). Repéré à <https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/meet.pdf>
- Tridel SA. (s.d.). Fonctionnement de l'usine. *Tridel*. Repéré à <https://www.tridel.ch/fr/fonctionnement-de-lusine>
- Ulusoy, G. (1985). The fleet size and mix problem for capacitated arc routing. *European Journal of Operational Research*, 22(85), 329-337.
- Ville de Montréal. (2006). *Chartre du piéton - document de consultation*. Ville de Montréal. Repéré à https://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=6877,63217598&_dad=portal&_schema=PORTAL
- Ville de Montréal. (2013a). Limite administrative de l'agglomération de Montréal (Arrondissements et Villes liées). [Jeu de données]. Repéré à <https://donnees.montreal.ca/ville-de-montreal/polygones-arrondissements>
- Ville de Montréal. (2013b). Géobase - réseau routier. [Jeu de données]. Repéré à <https://donnees.montreal.ca/ville-de-montreal/geobase>

- Ville de Montréal. (2013c). Secteurs Info-collectes. [Jeu de données]. Repéré à <https://donnees.montreal.ca/ville-de-montreal/info-collectes>
- Ville de Montréal. (2013d). Arrondissement de la Ville de Montréal - Liste. [Jeux de données]. Repéré à <https://donnees.montreal.ca/ville-de-montreal/arros-liste>
- Ville de Montréal. (2013e). Matières résiduelles - bilan massique. [Jeu de données]. Repéré à <https://donnees.montreal.ca/ville-de-montreal/matieres-residuelles-bilan-massique>
- Ville de Montréal. (2017). Unités d'évaluation foncière. [Jeu de données]. Repéré à <https://donnees.montreal.ca/ville-de-montreal/unites-evaluation-fonciere>
- Ville de Montréal. (2019). Géobase - noeuds. [Jeu de données]. Repéré à <https://donnees.montreal.ca/ville-de-montreal/geobase-noeud>
- Ville de Montréal. (2020). Complexe environnemental de Saint-Michel. *Montréal.ca*. Repéré à <https://montreal.ca/lieux/complexe-environnemental-de-saint-michel>
- Ville de Montréal. (2021). Ordures ménagères. Repéré à <https://montreal.ca/sujets/ordures-menageres>
- Ville de Montréal. (s.d.). Ville de Montréal - Environnement - Résidus domestiques dangereux. [Web page], Ville de Montréal. Repéré à http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=7237,75371620&_dad=portal&_schema=PORTAL
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., ... Scipy 1.0 Contributors. (2020). SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*, 17, 261-272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
- Wong, R. T. (2008). Vehicle Routing for Small Package Delivery and Pickup Services. Dans B. Golden, S. Raghavan, & E. Wasil (Éds), *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges* (pp. 475-485). Boston, MA : Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-77778-8_21

- Xue, W., & Cao, K. (2016). Optimal routing for waste collection: a case study in Singapore. *International Journal of Geographical Information Science*, 30(3), 554-572. <https://doi.org/10.1080/13658816.2015.1103374>
- Zsigraiova, Z., Semiao, V., & Beijoco, F. (2013). Operation costs and pollutant emissions reduction by definition of new collection scheduling and optimization of MSW collection routes using GIS. The case study of Barreiro, Portugal. *Waste Management*, 33(4), 793-806. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.11.015>