

Modélisation de scénarios de mobilité sur la carte carbone de Montréal

par

Marie-Alice PORTA

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

MONTRÉAL, LE 5 AOÛT 2025

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés, Marie-Alice Porta, 2025

II

©Tous droits réservés

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

PRÉSENTATION DU JURY

CE RAPPORT DE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Annie LEVASSEUR, directrice de mémoire
Département du génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Catherine MORENCY, codirectrice de mémoire
Département des génies civil, géologique et des mines à Polytechnique Montréal

M. Eric LACHANCE-TREMBLAY, président du jury
Département du génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Francis MARLEAU DONAIS, membre du jury
Département du génie de la construction à l'École de technologie supérieure

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

LE 8 JUILLET 2025

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Tout d’abord, j’adresse un remerciement tout particulier à ma directrice de recherche Mme Annie Levasseur, pour sa confiance, son accompagnement bienveillant et ses conseils tout au long de ces deux années de travail. Je suis profondément reconnaissante d’avoir pu participer à un projet si actuel et porteur de sens. Je tiens également à remercier ma co-directrice Mme Catherine Morency, pour son expertise et ses conseils, qui ont été essentiels à la réussite de ce projet. Mes remerciements vont également à Mme Sandrine Quéré, associée de recherche à l’ÉTS, pour son encadrement de qualité et sa réactivité. Je souhaite aussi remercier toute l’équipe de recherche, pour les échanges constructifs et les retours enrichissants qui ont pu nourrir ce mémoire.

J’aimerais également exprimer ma gratitude aux membres de mon jury Eric Lachance-Tremblay et Francis Marleau Donais pour leur disponibilité et pour avoir accepté de consacrer du temps à l’évaluation de mon mémoire.

Par ailleurs, je remercie toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la rédaction de ce travail. Je pense notamment à M. Gang Cao, ingénieur à la Division planification et développement de la mobilité de la Ville de Montréal, pour nos nombreux échanges et son aide précieuse. Merci aussi à Anouk Germain-Paquette, ingénieure à la Direction de la modélisation des systèmes de transport du Ministère des Transports et de la Mobilité durable pour sa réactivité et ses réponses à mes nombreuses questions.

Enfin, ce mémoire n’aurait pas pu être écrit sans le soutien infailible de ma famille, de mon compagnon et de mes amis, qu’ils soient à Montréal ou à 6 000 km. Je les remercie tous pour leur patience et pour avoir cru en moi.

Je dédie ce mémoire à mon grand-père, qui m’a inspirée tout au long de ma vie et sans qui je n’aurais jamais commencé mes études d’ingénieur. J’aurais aimé qu’il soit encore là pour lire le fruit de mon travail.

Modélisation de scénarios de mobilité sur la carte carbone de Montréal

Marie-Alice PORTA

RÉSUMÉ

Dans son Plan Climat, Montréal vise la carboneutralité en 2050, ciblant les secteurs les plus émetteurs. Dans ce cadre, la Chaire de recherche du Canada sur la mesure de l'impact des activités humaines sur les changements climatiques de l'ÉTS développe la Carte Carbone : un outil à haute résolution spatiale et temporelle permettant de quantifier les émissions de GES et de simuler l'impact de scénarios de réduction, à des fins de sensibilisation et d'aide à la décision.

Cette étude contribue au développement de méthodes de modélisation de scénarios de mobilité pour la Carte Carbone. Quatre scénarios en particulier ont été développés : promotion des modes actifs et promotion du covoiturage, électrification des véhicules et usage de carburants plus propres. Une méthodologie combinant l'Enquête Origine-Destination, le modèle de circulation AIMSUN et le modèle d'émissions MOVES a été appliquée à l'arrondissement de Saint-Laurent pour calculer les réductions d'émissions de CO₂ associées.

Les résultats indiquent que l'électrification accélérée de la flotte automobile est le scénario le plus efficace avec 12 % de réduction, tandis que la combinaison de tous les scénarios permet d'atteindre 20,72 %. Certains scénarios globalement bénéfiques entraînent toutefois une hausse de la congestion sur certaines sections du réseau.

Les méthodes proposées constituent une première base pour la modélisation de scénarios de mobilité sur la Carte Carbone. L'intégration de données de mobilité plus récentes et projetées temporellement et la diversification des scénarios simulés seront nécessaires pour améliorer la fiabilité des résultats.

Mots-clés : gaz à effet de serre, transport routier, Ville de Montréal, scénario de réduction d'émissions, inventaire d'émissions

Mobility Scenario Modeling on Montreal's Carbon Map

Marie-Alice PORTA

ABSTRACT

In its Climate Plan, the City of Montreal has committed to achieving carbon neutrality by 2050, prioritizing the most emission-intensive sectors. In this context, the Canada Research Chair in Measuring the Impact of Human Activities on Climate Change at ETS is developing the Carbon Map: a high-resolution spatial and temporal tool that quantifies GHG emissions and simulates the impact of mitigation scenarios for awareness and decision-making.

This study aims to develop methods for modeling transportation-related GHG reduction scenarios using the Carbon Map. Four specific scenarios have been examined: the promotion of active transportation, increased carpooling, electrification of the vehicle fleet, and a higher ethanol content in gasoline. An initial method has been developed, combining data from the Origin-Destination survey, the AIMSUN traffic model, and the MOVES emission model. The scenarios were applied to the Saint-Laurent district, and the associated reductions in GHG emissions were calculated.

The results show that fleet electrification is the most effective individual scenario, leading to a 12% reduction in emissions. When all four scenarios are combined, the total reduction reaches 20.72%. However, localized modeling reveals that certain scenarios, while being beneficial, may cause increased congestion on specific road sections.

The methods developed in this study form an initial methodological foundation for integrating mobility scenarios into the Carbon Map. However, incorporating more recent and temporally projected mobility data is essential for producing reliable results. Moreover, future research should develop the methodology to include a wider variety of scenarios.

Keywords : green house gases, road transportation, City of Montreal, emissions reduction scenario, emissions inventory

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	5
1.1 Transport et réchauffement climatique	5
1.1.1 Réchauffement climatique et émissions de GES	5
1.1.2 Les inventaires de GES du transport routier	6
1.1.2.1 Les émissions de GES du transport routier.....	7
1.1.2.2 Méthodes descendantes et ascendantes d’inventaire en transport routier.....	10
1.1.2.3 Inventaire de GES du transport routier à Montréal.....	12
1.1.3 Mesures de réduction d’émissions de GES du transport routier en ville..	13
1.1.3.1 Augmentation de la part modale des modes actifs.....	18
1.1.3.2 Démocratisation du covoiturage	20
1.1.3.3 Composition des carburants	21
1.1.3.4 Électrification de la flotte de véhicules.....	22
1.1.3.5 Écoconduite.....	23
1.2 Modélisation du transport routier urbain et de ses émissions	24
1.2.1 Modélisation de la circulation.....	25
1.2.1.1 AIMSUN.....	25
1.2.1.2 Modèle de circulation du MTMD	29
1.2.1.3 Modèle de circulation de l’arrondissement de Saint-Laurent	33
1.2.2 Modélisation des émissions	35
1.2.2.1 MOVES.....	35
1.2.3 Modélisation du choix modal.....	37
1.2.3.1 Modèle de choix modal.....	37
1.2.3.2 Méthodes alternatives	38
1.2.4 Notions de calibration	40
1.3 Modélisation de scénarios de mobilité.....	41
1.4 Objectifs.....	44
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE.....	47
2.1 Principe général de la Carte Carbone.....	47
2.2 Périmètre de l’étude	48
2.3 Typologies de scénarios et méthodes.....	50
2.3.1 Typologies.....	50
2.3.2 Méthodes.....	53
2.3.3 Choix des scénarios étudiés	63
2.4 Méthode d’inventaire à haute résolution spatiale	65
2.4.1 Modèle de circulation	65
2.4.1.1 Paramètres de base	65
2.4.1.2 Données en entrée	65

2.4.1.3	Données en sortie.....	66
2.4.2	Modèle d'émissions.....	66
2.4.2.1	Paramètres de base.....	66
2.4.2.2	Données en entrée.....	67
2.4.2.3	Données en sortie.....	69
2.4.3	Couplage des deux modèles.....	69
2.4.4	Visualisation des résultats à haute résolution spatiale.....	70
2.5	Modélisation des scénarios sélectionnés.....	71
2.5.1	Scénarios d'électrification de la flotte de véhicules.....	71
2.5.1.1	Données.....	71
2.5.1.2	Méthodes.....	72
2.5.2	Scénarios de modification de la composition de carburants.....	73
2.5.2.1	Données.....	73
2.5.2.2	Méthodes.....	74
2.5.3	Scénarios de modification des comportements de mobilité.....	74
2.5.3.1	Potentiel des modes actifs.....	75
2.5.3.2	Potentiel de covoiturage.....	80
2.5.3.3	Ajustement de la matrice OD.....	83
2.6	Combinaison de scénarios.....	87
CHAPITRE 3 RÉSULTATS.....		89
3.1	Simulation de référence.....	89
3.2	Scénarios électrification.....	93
3.3	Scénario E15.....	95
3.4	Scénario modes actifs.....	96
3.5	Scénario covoiturage.....	100
3.6	Combinaison et comparaison de scénarios.....	102
3.7	Visualisation des résultats sur la Carte Carbone.....	108
CHAPITRE 4 DISCUSSION.....		113
4.1	Bilan des résultats et interprétations.....	113
4.2	Limites des résultats.....	116
4.3	Recommandation pour les futures études et la carte carbone.....	117
4.3.1	Amélioration de la modélisation des scénarios.....	117
4.3.1.1	Modélisation de mesures de mobilité impactant la demande en transport.....	118
4.3.1.2	Scénario « Covoiturage ».....	118
4.3.1.3	Scénario « Modes actifs ».....	119
4.3.1.4	AIMSUN.....	120
4.3.1.5	MOVES.....	121
4.3.2	Enjeux sur les données.....	122
4.3.3	Estimation de l'impact des scénarios à haute résolution temporelle.....	123
4.3.4	Visualisation des résultats et stratégie de communication.....	123
CONCLUSION.....		125

ANNEXE I	APERÇU DE LA LITTÉRATURE TRAITANT DE LA MODÉLISATION ET L'ESTIMATION DE L'IMPACT DE SCÉNARIOS DE MOBILITÉ.....	129
ANNEXE II	ALGORITHME DE COUPLAGE DE AIMSUN ET MOVES	135
ANNEXE III	ALGORITHME POUR VISUALISATION DES RESULTATS A HAUTE RESOLUTION SPATIALE	141
ANNEXE IV	TABLEAUX 1 ET 2 RAPPORT DUNSKY, 2021	143
ANNEXE V	DISTANCES SEUIL DE MARCHE ET DE VELO DU SCENARIO MODES ACTIFS.....	145
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		147

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Facteurs d'émissions de carburants types.....8
Tableau 1.2	Comparaison entre les émissions de GES du transport en commun montréalais10
Tableau 1.3	Typologies et exemples de stratégies de réduction des émissions.....14
Tableau 2.1	Requis et contraintes majeurs par méthode62
Tableau 2.2	Paramètres de base sur l'interface MOVES.....67
Tableau 2.3	Données d'entrée des simulations MOVES.....68
Tableau 2.4	Description des scénarios d'électrification à l'étude72
Tableau 2.5	Exemple d'application de l'algorithme de transfert des passagers pour favoriser le covoiturage.....83
Tableau 3.1	Résultats de référence pour la simulation AIMSUN91
Tableau 3.2	Part des émissions par carburant pour le scénario « E15 ».....95
Tableau 3.3	Part des trajets transférables aux modes actifs sur tout le territoire de l'enquête OD98
Tableau 3.4	Part des trajets transférables aux modes actifs sur l'arrondissement de Saint-Laurent.....99
Tableau 3.5	Résultats des simulations de circulation AIMSUN pour les scénarios « Modes Actifs »99
Tableau 3.6	Résultats des simulations MOVES pour les scénarios « Modes Actifs »100
Tableau 3.7	Résultats des simulations de circulation AIMSUN pour les scénarios102
Tableau 3.8	Résultats des taux d'occupation des automobiles pour les scénarios « Covoiturage et Modes actifs »105
Tableau 3.9	Résultats des simulations de circulation AIMSUN pour les scénarios « Covoiturage et Modes actifs »105

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Émissions de CO ₂ e d'un véhicule particulier9
Figure 1.2	Modèle de circulation AIMSUN de l'arrondissement de Saint-Laurent du SUM.....27
Figure 1.3	Territoire du MOTREM13.....31
Figure 2.1	Méthodologie générale de l'inventaire à haute résolution spatiale.....47
Figure 2.2	Périmètre de l'arrondissement de Saint-Laurent.....49
Figure 2.3	Arbre des différentes typologies de scénarios52
Figure 2.4	Arbre des différentes typologies de scénarios53
Figure 2.5	Schéma de la première méthode56
Figure 2.6	Schéma de la troisième méthode.....58
Figure 2.7	Schéma de la quatrième méthode59
Figure 2.8	Exemple de distances.....77
Figure 2.9	Schéma de l'algorithme du transfert79
Figure 2.10	Liens entre les différentes données d'entrée de l'algorithme84
Figure 3.1	Parts modales des déplacements dans la simulation de référence90
Figure 3.2	Type de moteurs au sein de la flotte de véhicules privés.....90
Figure 3.3	Carte des émissions de GES du transport routier à haute résolution92
Figure 3.4	Types de moteurs au sein de la flotte de véhicules privés94
Figure 3.5	Émissions de GES de la flotte de véhicules privés montréalaise.....95
Figure 3.6	Distances seuil de la marche, 80 ^{ème} percentile.....96

Figure 3.7	Distances seuil du vélo, 80 ^{ème} percentile96
Figure 3.8	Impact des scénarios « Modes actifs » sur les parts modales de la circulation97
Figure 3.9	Impact des scénarios « Modes actifs » sur les parts modales de la circulation98
Figure 3.10	Impact des scénarios « Covoiturage » sur les parts modales101
Figure 3.11	Impact des scénarios « Covoiturage et Modes actifs »103
Figure 3.12	Impact des scénarios « Covoiturage et Modes actifs »104
Figure 3.13	Impact des principaux scénarios étudiés sur les émissions de GES106
Figure 3.14	Comparaison de l'impact des scénarios sur la réduction des émissions de GES par rapport aux émissions du trafic de référence à l'heure de pointe sur l'arrondissement de Saint-Laurent107
Figure 3.15	Carte des différences des émissions de GES du transport routier109
Figure 3.16	Carte des différences des émissions de GES du transport routier110

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AIMSUN Networks	Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and non-urban
ARTM	Autorité Régionale de Transport Métropolitain
BTER	Bureau de la transition écologique et de la résilience
CH ₄	Méthane
CIRAIG services	Centre international de référence sur cycle de vie des produits, procédés et
CO ₂	Dioxyde de carbone
COV	Composés Organiques Volatiles
CURB	Climate Action for Urban Sustainability
DA	Données d'activité
DTA	Dynamic Traffic Assignments
DUE	Dynamic User Equilibrium
E-85	Ethanol
ECCC	Environnement et Changement Climatique Canada
EIA	Energy Information Administration
EIE	Environmental Insights Explorer
EPA	Environmental Protection Agency
FE	Facteur d'émissions
GES	Gaz à Effet de Serre
GIEC	Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat
GPC	Green House Gases Protocol for Cities

XX

ICCT	International Council on Clean Transportation
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
VKT	Véhicules-Kilomètres Totaux
MOTREM	Modèle de transport urbain de la région de Montréal
MOVES	MOtor Vehicle Emission Simulator
MTMD	Ministère des Transports et de la Mobilité Durable du Québec
NTS	National Travel Survey
NH ₃	Ammoniac
N ₂ O	Protoxyde d'azote
NO _x	Oxydes d'azote
O ₃	Ozone
OD	Origine-Destination
PM _{2.5}	Particules fines à inférieures à 2,5 µm
PM ₁₀	Particules fines à inférieures à 10 µm
PMAD	Plan Métropolitain d'Aménagement et de Développement
PRG	Pouvoir de Réchauffement Global
RunSpec	Run Specifications
SAAQ	Société de l'Assurance Automobile du Québec
SO ₂	Dioxyde de soufre
SQL	Structured Query Language
SRC	Stochastic Route Choice
STA	Static Traffic Assignments
STM	Société de Transport de Montréal

SUE	Stochastic User Equilibrium
SUM	Service de l’Urbanisme et de la Mobilité de Montréal
TC	Transport en Commun
VMT	Vehicle-Miles Traveled
VSP	Vehicle Specific Power
VUS	Véhicule Utilitaire Sport

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

m	mètre
km	kilomètre
km ²	kilomètre carré
g	gramme
kg	kilogramme
t	tonne
gCO ₂ e	gramme de CO ₂ équivalent
kgCO ₂ e	kilogramme de CO ₂ équivalent
tCO ₂ e	tonne de CO ₂ équivalent
gCO ₂	gramme de CO ₂
kgCO ₂	kilogramme de CO ₂
tCO ₂	tonne de CO ₂
L	litre
J	joule
MJ	mégajoule
W	watt
°C	degré celsius
h	heure
\$	dollar
km/h	kilomètre par heure
g/km	gramme par kilomètre

XXIV

kgCO ₂ e/L	kilogramme de CO ₂ équivalent par litre
gCO ₂ e/MJ	gramme de CO ₂ équivalent par mégajoule
kW/t	kilowatt par tonne

INTRODUCTION

La lutte contre le réchauffement climatique est cruciale pour les villes, qui doivent trouver des moyens efficaces de réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. Il est ainsi impératif pour celles-ci d'identifier les secteurs les plus émissifs afin de mettre en place des mesures ciblées. Parmi ces secteurs, le transport se distingue comme l'un des principaux contributeurs. En effet, il représente 25% de la consommation finale d'énergie et génère 40% des émissions de GES des secteurs d'utilisation finale dans le monde (International Energy Agency, 2023) tandis qu'au Canada, il représentait presque 25% des émissions de GES du pays en 2021 (Régie de l'énergie du Canada, 2023).

Au Québec, le secteur des transports se classe comme le plus grand émetteur de GES, représentant 43,3% des émissions de GES (Ministère de l'environnement, de la lutte contre les changements climatiques, de la faune et des parcs du Québec, 2022). À Montréal spécifiquement, le transport représente la part prépondérante des émissions de GES, et celles-ci sont en augmentation : 42,7% des émissions de GES sont dues au transport, dont 71,9% sont imputables au secteur routier en 2022 (Bureau de la transition écologique et de la résilience de Montréal, 2024).

En plus d'accentuer le réchauffement climatique, l'usage accru de l'automobile engendre également des enjeux sanitaires majeurs. La qualité de l'air en milieu urbain s'est considérablement dégradée ces dernières années (Smargiassi et al., 2020). De ce fait, de nombreuses municipalités s'efforcent de promouvoir une mobilité durable et multimodale afin de réduire la dépendance à la voiture individuelle.

Différentes solutions sont envisagées par les municipalités afin de réduire les conséquences néfastes du transport routier. L'usage de modes de transport alternatifs comme les transports en commun ou les modes actifs est encouragé à travers différentes mesures comme la mise en place de zones piétonnes ou la création d'un système de location de vélo (Ville de Montréal, 2021). Des normes encadrant la composition des carburants contribuent à la réduction des

émissions de polluants, notamment grâce à un usage plus important de l'éthanol et du biodiesel (Gouvernement du Québec, 2021). Parallèlement, l'augmentation progressive des véhicules électriques au sein de la flotte automobile de la ville renforce cette tendance (Ville de Montréal, 2021). Des mesures liées à la conduite peuvent également être adoptées, comme l'instauration de limitations de vitesse ou la sensibilisation des populations à l'écoconduite.

Face à ces différents enjeux, la ville de Montréal a pris plusieurs résolutions. Afin de s'aligner sur les Accords de Paris et réduire les émissions de GES, le Québec s'est engagé dans son plan Action-Climat à réduire ses émissions de 37,5 % sous le niveau de 1990 d'ici 2030 afin d'atteindre la carboneutralité en 2050 (Gouvernement du Québec, 2020). La ville de Montréal a quant à elle des objectifs encore plus ambitieux puisque son Plan Climat vise une réduction de 55% sous le niveau de 1990 de ses émissions des GES d'ici 2030 et la carboneutralité pour 2050 (Ville de Montréal, 2021). Concernant l'aménagement durable de la ville, Montréal a publié le Plan Métropolitain d'Aménagement et de Développement du grand Montréal (PMAD). Celui-ci a notamment pour objectif d'accroître la part modale des transports en commun, c'est-à-dire la proportion des déplacements effectués en transport en commun par rapport à l'ensemble des modes de transport, de 25 % à 35 % d'ici 2031 (Communauté métropolitaine de Montréal, 2012).

Afin d'atteindre leurs objectifs et planifier des politiques de transport efficaces, les villes ont besoin d'outils de mesure des émissions précis, qui leur permettent de faire des estimations sur les possibles gains de leurs projets de mobilité. Actuellement, la ville de Montréal utilise l'outil Google *Environmental Insights Explorer (EIE)* pour l'estimation de ses inventaires. Les résultats de cet inventaire sont des données annualisées agrégées sur l'ensemble du territoire de la municipalité, ce qui ne permet pas une analyse poussée des données d'émissions de GES. (Bureau de la transition écologique et de la résilience de Montréal, 2024). L'élaboration d'une méthode d'inventaire plus précise présenterait donc un fort intérêt pour la ville. Dans cette optique, la Chaire de recherche sur du Canada sur la mesure de l'impact des activités humaines sur les changements climatiques développe actuellement un outil appelé « Carte Carbone » : un inventaire cartographique des émissions de GES de la Ville de Montréal. Celui-ci

permettrait de visualiser les émissions des différents secteurs, dont celui des transports, avec une haute résolution spatiale et temporelle. Dans le cas du transport routier, l'objectif est de rendre les données d'émissions disponibles pour chaque heure et chaque section de route. Pensée comme un outil en libre accès, la Carte Carbone devra pouvoir bénéficier à la fois à la municipalité et aux citoyens, que ce soit dans un but informatif ou décisionnel. Plus qu'un inventaire en ligne des émissions, il s'agirait également un moyen de tester l'impact de différentes mesures de mobilité. Auparavant, une première étude réalisée par N. Stéphan dans son mémoire de maîtrise « Estimation des émissions de CO₂ à haute résolution spatiale et temporelle pour le transport routier de l'arrondissement montréalais de Saint-Laurent » (2023) a permis de faire des recommandations méthodologiques sur les modèles de circulation et d'émissions utilisés dans le projet. Le projet est d'abord développé à l'échelle de l'arrondissement de Saint-Laurent afin de valider une première méthodologie, qui pourra ensuite être déployée à l'ensemble de la ville.

Ainsi, l'objectif principal de ce mémoire est de développer un cadre méthodologique pour modéliser et visualiser les émissions de GES associées à différents scénarios de décarbonation du transport à l'échelle d'un arrondissement montréalais, dans le but de les intégrer à l'outil numérique de la Carte Carbone de Montréal. Le premier objectif consiste à analyser et classifier les différents types de scénarios de mobilité à partir de la littérature, en identifiant leurs contraintes de modélisation, afin d'établir un cadre permettant de déterminer quels scénarios peuvent être modélisés dans le contexte de la Carte Carbone à partir des données et outils disponibles. Ensuite, le second objectif vise à concevoir et mettre en œuvre quatre premières méthodes de modélisation adaptées à différents types de scénarios, en partant du traitement des données d'entrée jusqu'à la production de résultats à haute résolution spatiale, tout en assurant leur intégration cohérente dans les modèles de trafic AIMSUN et d'émissions MOVES. Enfin, le dernier objectif est de développer un cadre de modélisation réutilisable et adaptable à d'autres scénarios. L'application des méthodologies doit être facilitée en assurant un couplage efficace entre le modèle de trafic AIMSUN et le modèle d'émissions MOVES, notamment par l'automatisation du formatage des données.

Le présent document débute par une revue de littérature sur les méthodes de modélisation de scénarios de réduction d'émissions de GES dans les villes. Les différentes approches d'inventaires d'émissions de GES et de planification en transport de Montréal seront étudiées. Ensuite, une liste non exhaustive de scénarios de mobilité sera considérée afin d'en souligner les intérêts et les limites, et les différentes méthodes de modélisation utilisées dans la littérature seront examinées. Le deuxième chapitre du mémoire est consacré à l'élaboration des méthodes qui seront nécessaires à la modélisation de scénarios de réduction d'émissions de GES à Montréal. Pour chaque scénario étudié, l'analyse des résultats d'inventaires d'émissions de GES est réalisée dans le troisième chapitre. Quant au dernier chapitre, il expose des recommandations pour la suite du projet de Carte Carbone et discute des résultats obtenus. Enfin, le document se termine par une conclusion rappelant les objectifs du mémoire et offrant des perspectives pour la suite du projet.

L'étude entreprise dans ce mémoire porte seulement sur les méthodes d'estimation de scénarios pour la Carte Carbone. Les questions d'acquisition des données de circulation et d'estimation de la demande en transport n'y seront pas abordées, et sont le sujet d'autres mémoires en cours d'écriture.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Transport et réchauffement climatique

Afin de lutter contre le réchauffement climatique, il est essentiel de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'échelle globale. Au Québec, le secteur des transports constitue la principale source d'émissions, faisant de lui un levier majeur pour atteindre les objectifs de décarbonation de la province. Il est donc crucial de mettre en place des outils de suivi permettant d'évaluer ces émissions dans le temps et de développer des stratégies visant à limiter l'empreinte carbone des déplacements.

1.1.1 Réchauffement climatique et émissions de GES

L'effet de serre est un phénomène naturel permettant de retenir une partie des rayonnements solaires dans l'atmosphère terrestre sous forme de chaleur, ce qui permet de maintenir la température moyenne de la surface de la Terre à +15 °C. On appelle gaz à effet de serre (GES), les gaz de l'atmosphère terrestre qui permettent l'absorption d'une partie de ces rayons. Ils sont composés en majorité de vapeur d'eau (H₂O), de dioxyde de carbone (CO₂), de méthane (CH₄), de protoxyde d'azote (N₂O) et d'ozone (O₃). Toutefois, depuis la Révolution Industrielle, la concentration atmosphérique de ces gaz, en particulier du CO₂, a commencé à augmenter avec la combustion accrue de combustibles fossiles. Cette augmentation provoque un dérèglement global du climat. Communément appelé réchauffement climatique, ce phénomène provoque la hausse de la température moyenne mondiale. Les conséquences sont dramatiques pour l'environnement puisque cela est la cause de plusieurs problèmes majeurs comme la fonte des glaciers ou la chute de la biodiversité (Ministère québécois de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs, 2024). Afin de lutter contre le changement climatique, 195 États se sont engagés en 2015 dans le cadre de l'Accord de Paris à limiter le réchauffement planétaire bien en deçà de 2 °C, et à poursuivre les efforts pour ne pas dépasser 1,5 °C (ECCC, 2016). D'après le dernier rapport

du GIEC, un réchauffement plafonné à 1,5 °C nécessiterait une réduction globale de 43 % des émissions de GES d'ici 2030 comparé aux émissions en 2022 (GIEC, 2023).

Afin de pouvoir comparer l'effet sur le climat des différents gaz à effet de serre, un indicateur nommé « Pouvoir de Réchauffement Global » (PRG) a été introduit. Celui-ci quantifie l'impact d'un gaz sur le réchauffement climatique par rapport au dioxyde de carbone (CO₂), qui est utilisé comme référence avec un PRG de 1. Le PRG indique donc combien de fois un gaz spécifique piège plus ou moins de chaleur dans l'atmosphère que le CO₂ sur une période donnée, souvent fixée à 100 ans. Par exemple, le méthane CH₄ fossile a un PRG relatif de 29,8 et le protoxyde d'azote N₂O de 273 (GIEC, 2023). Cependant, le gaz à effet de serre contribuant le plus au réchauffement climatique reste le CO₂, puisqu'il était responsable de 68 % des émissions de GES additionnelles anthropiques en 2023 (United Nations Environment Programme, 2024).

1.1.2 Les inventaires de GES du transport routier

Pour évaluer l'évolution de l'impact des activités humaines sur les émissions de gaz à effet de serre, il est nécessaire de produire des inventaires permettant de les quantifier dans le temps. Ces inventaires peuvent être réalisés à différentes échelles, allant du niveau local au niveau national, et peuvent s'appliquer à divers types d'entités, telles qu'une entreprise, un état, une administration publique, ou même un secteur spécifique. Différentes méthodes permettent de les établir, s'appuyant sur des approches « descendantes » (*top-down*) ou « ascendantes » (*bottom-up*) (Fong et al., 2021), dont les spécificités dans le contexte des inventaires du transport routier sont détaillées en 1.1.2.3.

Ce mémoire porte spécifiquement sur l'inventaire municipal de la Ville de Montréal. Ce type d'inventaire fait l'état des lieux (Gouvernement du Québec, 2024) :

- des émissions des bâtiments résidentiels, institutionnels, commerciaux et industriels ;
- des émissions du transport routier et hors route ;
- des matières résiduelles ;

- de l'agriculture ;
- et des procédés industriels.

La plupart des inventaires des collectivités sont calculés en suivant les directives du *GHG Protocol for Cities (GPC)*, qui est un protocole international conçu pour aider les villes et les collectivités à mesurer leurs émissions de GES. Ce protocole offre une méthodologie standardisée, permettant de faciliter la comparaison des inventaires et le suivi des émissions vis-à-vis des objectifs internationaux (Fong et al., 2021).

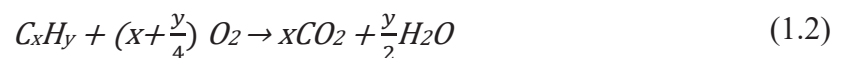
Pour chaque secteur d'émissions, le GIEC recommande dans leur rapport de 2006 d'effectuer les calculs d'émissions selon l'équation suivante :

$$Emissions = DA * FE \quad (1.1)$$

Avec DA des données d'activité relatives au secteur et FE le facteur d'émissions correspondant. Les émissions sont généralement exprimées en masse de CO₂ équivalent. Par exemple, dans le secteur de l'énergie, la quantité de combustible consommé peut être considérée comme une donnée d'activité, tandis que le CO₂ émis par unité de combustible consommé constitue un facteur d'émissions (Paciornik et al., 2006).

1.1.2.1 Les émissions de GES du transport routier

Dans le cas des émissions de GES du transport routier, celles-ci sont directement proportionnelles à la consommation de carburant des véhicules à moteur thermique, comme le montre l'équation chimique de la combustion complète d'un hydrocarbure de type C_xH_y.



Les carburants les plus utilisés sont l'essence et le diesel. L'*Environmental Protection Agency* (EPA) met à disposition en accès libre des bases de données de facteurs d'émissions type. En 2024, les facteurs d'émissions des principaux carburants sont les suivants :

Tableau 1.1 Facteurs d'émissions de carburants types

Adapté de l'EPA (2024)

Type de carburant	kg CO ₂ / L
Essence	2,32
Diesel	2,70
Ethanol (100%)	1,52
Biodiesel	2,50

Néanmoins, les émissions de GES par kilomètre parcouru ne sont pas constantes lors de l'usage d'un véhicule. Dans un premier temps, les émissions sont plus ou moins importantes selon si le véhicule est en fonctionnement à chaud ou en démarrage à froid. Les émissions à chaud correspondent aux gaz produits par la combustion lorsque le moteur a atteint sa température de fonctionnement optimale stabilisée, tandis que les émissions de démarrage à froid, plus élevées, représentent l'excès de gaz émis lorsque le moteur est encore en dessous de sa température optimale. De plus, la quantité d'émissions dépend de plusieurs autres facteurs comme la vitesse du véhicule, son poids ou encore la pente de la route. Le facteur ayant l'impact le plus significatif est la vitesse. Dans le cas d'un véhicule particulier moyen, les courbes des émissions de CO₂ en fonction de la vitesse ont une forme en « U » : le minimum de consommation est atteint aux alentours de 70 km/h avec des émissions de l'ordre de 150 g/km (*Voir* figure 1.1, p.9). Les consommations maximums sont à faible vitesse, atteignant 300 g/km à 10 km/h (Martin, 2021). De ce fait, un trafic congestionné engendre une forte consommation de carburant.

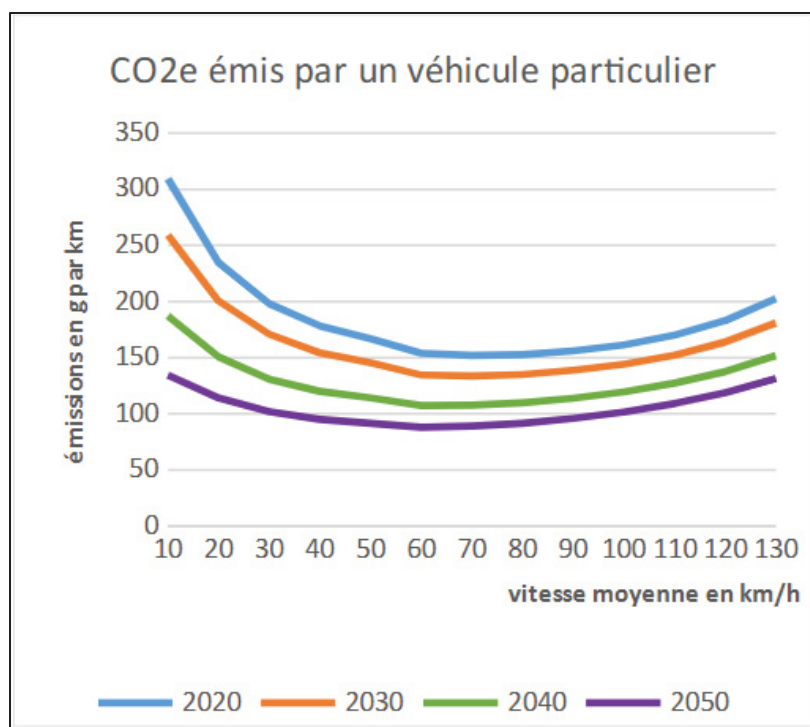


Figure 1.1 Émissions de CO₂e d'un véhicule particulier en fonction de la vitesse, en intégrant l'évolution possible du parc automobile français selon la Stratégie nationale bas-carbone

Tirée de Martin (2021)

Il existe différents types de transports motorisés et tous n'ont pas le même impact environnemental : ce dernier dépend principalement de leur consommation d'énergie, leur taux d'occupation et le type de carburant utilisé (Poliquin, 2012). En contexte urbain, les véhicules sont majoritairement des voitures individuelles (citadines, berlines, VUS...), des transports en commun (autobus, trains, métros...), des véhicules utilitaires légers ou des camions. La voiture individuelle est le mode de transport le plus répandu à Montréal (ARTM, 2020) et l'un des plus polluants par passager transporté (*Voir* tableau 1.2, p.10). En effet, elle est souvent sous-utilisée en termes de capacité, avec par exemple un taux d'occupation moyen par déplacement en heure de pointe de seulement 1,2 personne par véhicule à Montréal en 2018 (ARTM, 2020).

De plus, la flotte de véhicules privés continue de croître dans beaucoup de villes, comme à Montréal où celle-ci a augmenté de 4 % entre 2017 et 2022 (ARTM, 2024). Les véhicules sont également de plus en plus gros du fait de la popularité grandissante des Véhicules Utilitaires Sport (VUS). A Montréal, la proportion de camions légers (VUS, camionnettes) dans la flotte, est passée de 37,4 % en 2013 à 49,3 % en 2021 (Pineau et al., 2023).

Les transports en commun offrent un bien meilleur facteur d’émissions par passager-km que la voiture individuelle, surtout aux heures de pointe, lorsque leur taux d’occupation est élevé. Le tableau ci-dessous permet ainsi de comparer les facteurs d’émissions des transports en commun de la ville de Montréal avec des facteurs d’émissions typiques d’automobiles fonctionnant à l’essence.

Tableau 1.2 Comparaison entre les émissions de GES du transport en commun montréalais et celles de l’automobile
Adapté de la STM (2024) et Gagnon (2006)

Type de véhicule	Emissions par passager-km (gCO ₂ e)	Emissions par place-km (gCO ₂ e)
Tout véhicule STM (bus et métro)	45	10
Bus STM	113	28
Automobile essence 12L/100km	286 pour un véhicule ne contenant qu’un passager	57
Automobile essence 9L/100km	214 pour un véhicule ne contenant qu’un passager	43

1.1.2.2 Méthodes descendantes et ascendantes d’inventaire en transport routier

Dans le cas des émissions de GES du transport routier, les méthodes descendantes d’inventaire des émissions de GES se basent sur la consommation de carburants comme premier indicateur des déplacements des véhicules. Une méthode par vente de carburants consiste à déduire les

émissions de gaz à effet de serre des données de ventes de carburants des stations essence du territoire à l'étude. Les émissions sont le résultat du volume total de carburant vendu, multiplié par un facteur d'émissions de GES associé au type de carburant. Étant simple, rapide et peu onéreuse, cette méthode est extrêmement répandue. De ce fait, elle est aisément accessible à de nombreux territoires, ce qui rend possible la comparaison de leurs différents inventaires entre eux. Toutefois, plus le territoire à l'étude est à échelle réduite, plus cette méthode s'avère imprécise. En effet, elle ne prend pas en compte le lieu de consommation réelle, mais seulement celui de la vente de carburant (Fong et al., 2021).

L'approche ascendante se base quant à elle sur des données d'activité détaillées. Il s'agit d'une approche plus longue nécessitant plus de moyens technologiques et financiers. Dans le cas du transport routier, elle consiste à réaliser un inventaire d'émissions de GES basé sur les déplacements des véhicules. C'est une approche dont la méthode est adaptée à chaque territoire étudié, ce qui rend la comparaison des résultats d'inventaires de territoires différents plus difficile. Néanmoins, son avantage majeur est qu'elle permet une haute résolution spatiale et temporelle de l'inventaire des émissions. Ce type d'approche permet de retracer l'origine des émissions et d'identifier les leviers d'atténuation. En général, les données de déplacements sont estimées à partir de modélisation de la circulation à partir desquelles le trafic est évalué dans le but de déduire les émissions engendrées (Fong et al., 2021).

Une méthode de ce type est notamment utilisée dans le projet HESTIA, initialement mis en place dans la ville d'Indianapolis (Indiana, USA). Celui-ci vise à quantifier les émissions de gaz à effet de serre d'une métropole, à l'échelle des rues et des bâtiments toutes les heures. Ce projet a également été implémenté dans le bassin de Los Angeles, Salt Lake City et Baltimore. Pour ce faire, diverses bases de données et outils de simulation relatifs au trafic routier, à la pollution atmosphérique locale, à la production d'électricité et à la consommation énergétique des bâtiments sont mobilisés. Les méthodes développées se veulent applicables à des villes similaires, moyennant une adaptation des données locales (Gurney et al., 2012).

1.1.2.3 Inventaire de GES du transport routier à Montréal

Chaque année, un inventaire des émissions de GES de la collectivité montréalaise est calculé par le Bureau de la Transition Écologique et de la Résilience (BTER) en suivant les lignes directrices du GPC (BTER, 2024). Dans le cas des émissions de GES du secteur du transport routier, celles-ci sont actuellement calculées à l'aide d'un outil Google appelé *Environmental Insights Explorer*. À partir de facteurs d'émissions de GES standards et de données de circulation telles que celles de Google Maps, cette plateforme en ligne gratuite permet aux villes d'estimer leurs émissions de GES et leur potentiel de réduction. Quatre catégories de données sont accessibles : les émissions de GES des bâtiments, celles des transports, le potentiel énergétique solaire et le couvert forestier. Dans le cas des émissions du transport, Google EIE base ses calculs sur une estimation du nombre de kilomètres parcourus par les véhicules et la consommation moyenne de carburant par kilomètre (Google, 2024). Les valeurs des émissions de GES des transports routiers à Montréal sont directement tirées de cette plateforme. Les facteurs d'émissions des automobiles et des bus sont tirés de données régionales issues de l'outil Climate Action for Urban Sustainability (CURB), développé par la Banque Mondiale. Celles-ci permettent de connaître la part de consommation des types de carburants essence, éthanol, diesel et biodiesel au sein de la flotte. Ainsi, le facteur d'émissions final des automobiles est recalculé en sommant les facteurs d'émissions de chaque type de carburant multipliés par leur part de consommation réelle à Montréal. Les résultats de cet inventaire sont des données annualisées agrégées sur l'ensemble du territoire de la municipalité (BTER, Ville de Montréal, 2024). Cet inventaire est donc peu détaillé et ne permet pas d'analyse très poussée des données d'émissions de GES.

Le projet de Carte Carbone viendrait ainsi répondre aux limites des inventaires actuels en fournissant des données d'émissions à haute résolution spatiale et temporelle, notamment pour le secteur des transports, tout en permettant d'estimer les impacts localisés de différentes mesures de réduction des émissions.

1.1.3 Mesures de réduction d'émissions de GES du transport routier en ville

Pour respecter les Accords de Paris et réduire les émissions de GES en milieu urbain, diverses mesures peuvent être mises en place dans les collectivités afin de limiter l'impact du transport routier. Dans le troisième volet de son sixième rapport, consacré aux scénarios de réduction d'émissions de GES, le GIEC souligne l'importance de plusieurs mesures dans le domaine des transports. D'après cette étude, les villes pourraient réduire leur consommation d'essence de 25 % grâce à un usage plus dense des territoires et la mise en place d'infrastructures réduisant la dépendance à la voiture individuelle (GIEC, 2023).

De nombreuses mesures de réduction d'émissions de GES existent et ont déjà été mises en place dans des collectivités. Dans sa thèse, Nouri (2016) en fait une liste non-exhaustive, dont elle fait le résumé dans le tableau suivant :

Tableau 1.3 Typologies et exemples de stratégies de réduction des émissions

Adapté de Nouri (2016)

Stratégies de réduction des émissions		
Demande en transport et transfert modal		<ul style="list-style-type: none"> - Taxation ; - Fermeture de sections du réseau ; - Péage routier ; - Réglementation des stationnements ; - Réduction des limites de vitesse ; - Limitation de la construction de nouvelles infrastructures routières ; - Télétravail ; - Planification de l'usage des sols ; - Mise en place de parkings relais ; - Amélioration du réseau de transport en commun ; - Incitation aux transports actifs ; - Déploiement de campagnes de sensibilisation.
Type de carburant	Conventionnel	<ul style="list-style-type: none"> - Limitation du niveau de sulfure ; - Ajout d'additifs dans les carburants.
	Alternatif	<ul style="list-style-type: none"> - Biocarburants ; - Gaz naturel comprimé ; - Véhicules électriques.

Tableau 1.3 Typologies et exemples de stratégies de réduction des émissions

Adapté de Nouri (2016) (suite)

Stratégies de réduction des émissions			
Économie de carburant	Relative à la flotte		<ul style="list-style-type: none"> - Réglementation sur la fabrication ; - Élimination des véhicules les plus anciens et polluants.
	Relative à l'usage	Gestion et apaisement de la circulation	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction de la congestion ; - Gestion de la vitesse ; - Apaisement de la circulation.
		Écoconduite	<ul style="list-style-type: none"> - Limitation des accélérations ; - Anticipation du trafic ; - Maintien d'une vitesse constante ; - Respect des limites de vitesse ; - Changement de vitesse dès que possible ; - Limitation des marches à vide excessives ; - Réduction de l'usage de la climatisation ; - Fermeture des fenêtres à haute vitesse ; - Choix d'itinéraires favorisant l'écoconduite.

Trois types de mesures se distinguent :

1) Les politiques encourageant le transfert modal et la réduction de la demande en transport : il s'agirait de réduire le nombre de kilomètres parcourus par les véhicules, dits les véhicules-kilomètres totaux (VKT). Cela passe par exemple par le transfert des déplacements effectués en automobile individuelle vers des trajets en transport actif ou collectif ; par la suppression de certains trajets motorisés grâce à la promotion du télétravail ; par la densification des quartiers et la relocalisation des logements afin de favoriser l'accès à des services de proximité ; ou la mise en place de zones interdites aux véhicules motorisés ;

- 2) Les changements de technologies automobiles et l'amélioration de leur efficacité avec notamment la démocratisation des véhicules électriques ;
- 3) Les politiques menant à des économies de carburant comme les limitations de vitesse ou les campagnes de sensibilisation à l'écoconduite (Winkler L. et al., 2023 et Nouri P., 2016).

La littérature sur les transports s'accorde à dire que l'électrification à elle seule n'est pas une solution viable et qu'une combinaison de plusieurs mesures politiques est nécessaire. Parmi ces politiques, celles menant à la réduction du nombre de déplacements en voiture a un très fort potentiel de diminution des émissions de GES (Winkler L. et al., 2023).

Dans cette optique, les acteurs de la Ville de Montréal élaborent régulièrement des plans d'action faisant la promotion de mesures encourageant les mobilités durables, que ce soit à l'échelle de la ville, d'un arrondissement ou d'un quartier.

En 2012, le Plan métropolitain d'aménagement et de développement du Grand Montréal (PMAD) est notamment publié. Il encourage par exemple à privilégier la mobilité active et à développer des quartiers de type *Transit-Oriented Development (TOD)*, en visant à concentrer au moins 40 % des futurs projets d'urbanisation dans un rayon d'un kilomètre autour des stations de transport en commun. Il fixe également l'objectif d'atteindre une part d'utilisation du transport en commun par rapport aux autres modes de transport de 35 % lors de l'heure de pointe du matin d'ici 2031 (Communauté métropolitaine de Montréal, 2012).

Plus récemment, la Ville a publié son plan Climat 2020-2030, dans lequel elle affiche de claires ambitions de décarboner le transport routier au sein de la municipalité. Ses trois objectifs majeurs sont le transfert de 25 % des déplacements en voiture individuelle vers des modes de transport plus durables, l'augmentation de l'électrification des véhicules et l'aménagement de quartiers à taille humaine. Pour ce faire, différentes actions sont mises en place, comme l'ajout de bornes de recharges électriques sur l'ensemble du territoire montréalais, le projet de l'électrification de toute la flotte de bus STM ou encore le développement des transports

collectifs et actifs dans tous les quartiers avec par exemples l'ajout de voies cyclables et l'amélioration du service de vélopartage (Ville de Montréal, 2021).

Les quartiers de Montréal affichent également une volonté de décarboner le transport, comme l'arrondissement de Saint-Laurent dans son Plan Local de Déplacement publié en 2017. Les mesures planifiées dans celui-ci visent à favoriser le transport collectif et actif. Il s'agit par exemple de la poursuite de la construction d'une vélo-route, de la prolongation du métro, de l'amélioration du réseau piétonnier, de la mise en place de voies réservées pour les bus, du développement des secteurs *TOD*, de la promotion du service d'autopartage ou encore de l'aménagement de pôles de mobilité durable (Arrondissement de Saint-Laurent, 2017).

De multiples mesures de réduction d'émissions de GES du transport routier existent donc, mais leur impact réel sur les émissions de GES n'est pas aisément quantifiable. Cela met en lumière la nécessité de développer des méthodes d'estimation de l'effet de ces politiques de manière précise dans le temps et dans l'espace. Une des grandes difficultés de la planification de mesures de réduction d'émissions de GES du transport est que leurs résultats sont parfois très imprévisibles. En effet, plusieurs mesures peuvent mener à des effets qui ne sont pas ceux espérés, comme par exemple les « effets rebonds » : au lieu de réduire les émissions, certaines actions peuvent au contraire mener à une augmentation des émissions. Le télétravail, qui permet de réduire le nombre de trajets domicile-travail est susceptible d'engendrer de nombreux effet rebonds, comme par exemple l'emménagement dans un nouveau logement plus grand et plus éloigné du lieu de travail, potentiellement moins bien desservi par les transports en commun et à la consommation énergétique plus importante (ADEME, 2020). Certaines mesures peuvent également induire des reports modaux dits « négatifs » : par exemple, des transports en commun très attractifs peuvent finalement convaincre des usagers du vélo ou de la marche d'abandonner ces modes de transport au profit du métro ou du bus.

Dans son mémoire, M. Perreault (2009) a cherché à déterminer quelles sont les mesures les plus efficaces à la réduction de l'utilisation des véhicules particuliers au Québec, en analysant à la fois des initiatives locales et des exemples internationaux. Chaque mesure a été étudiée en

termes de potentiel de réduction des GES, de coûts associés et du coût par tonne de CO₂ évitée. Une évaluation globale a également intégré des critères environnementaux, économiques, sociaux et de gouvernance pour comparer les mesures dans une perspective de développement durable. L'étude présente des limites, notamment en raison des biais possibles liés aux estimations et aux méthodologies variées utilisées. Néanmoins, elle permet d'identifier des mesures à fort potentiel, comme par exemples les stratégies de gestion des stationnements. Cela permet également de mettre en lumière que certaines actions, bien que coûteuses, peuvent générer des économies ou des profits. Un plan d'action de 19 recommandations spécifiques à la province du Québec conclue l'analyse, qui préconise par exemple la mise en place de péages urbains sur l'île de Montréal ou la promotion de l'autopartage.

Dans la suite de ce chapitre, plusieurs moyens de réduire les émissions de GES des transports en ville seront mis en lumière. Néanmoins, cette liste n'est pas exhaustive et les différentes mesures évoquées ont été choisies car elles font l'objet d'une étude plus approfondie dans ce mémoire.

1.1.3.1 Augmentation de la part modale des modes actifs

La part modale désigne la proportion de déplacements réalisés au moyen d'un mode de transport donné, par rapport à l'ensemble des déplacements effectués sur un territoire ou durant une période donnée. Ainsi, une des principales mesures permettant de réduire les émissions de GES serait le transfert d'une part des déplacements effectués en véhicules motorisés vers des modes de transport actifs. Cela implique une augmentation de la part modale de la marche, du vélo ou d'autres modes durables. En ce sens, les municipalités s'efforcent depuis plusieurs années de favoriser ces modes de déplacement à travers diverses politiques et aménagements. En effet, outre leur impact positif sur l'inventaire de GES municipal, diminuer l'usage de l'automobile au profit de ces modes aurait bien d'autres bénéfices : diminution de la pollution de l'air, diminution de certaines maladies au sein de la population ou encore baisse de la pollution sonore (Smargiassi et al., 2020).

De nombreux auteurs ont étudié les facteurs influençant l'usage de ces modes. Ceux-ci sont très nombreux : la météo, la sécurité, la présence de services de vélos partagés et de porte-vélos, la distance du trajet ou encore la topographie en sont quelques exemples. Le choix d'utiliser ces modes est également corrélé à certaines caractéristiques personnelles, comme l'âge ou le genre (Goldsmith, 1992 et Poliquin, 2012). Une des variables les plus importantes est la distance du trajet, c'est pourquoi plusieurs auteurs ont cherché à identifier des distances seuils à partir desquelles les individus ne sont plus prêts à utiliser les modes actifs. Cette distance seuil varie avec l'âge de l'individu, puisque en général les enfants et les personnes âgées se déplacent peu en vélo et parcourent moins de distance à pied (Morency C. et al., 2014).

Une bonne manière d'estimer dans un premier temps les bénéfices pouvant être espérés après l'instauration de politiques favorisant ces modes de transport est le calcul de leur potentiel maximum d'usage. En effet, certaines de ces politiques pourraient finalement s'avérer inefficaces s'il est constaté que le potentiel maximum d'utilisation de ces modes est déjà quasiment atteint. Dans cette optique, plusieurs études ont été menées par Morency C. et al. (2014 et 2020a) afin de quantifier ce potentiel spécifiquement à Montréal. Des critères d'exclusion basés sur l'âge et le genre des individus, la distance et la structure de leurs trajets ont été appliqués afin d'estimer combien de déplacements actuellement effectués en automobile pourraient être réalisés en modes actifs par la population. Des distances seuils, définies par genre et par tranche d'âge, ont été établies pour la pratique du vélo et de la marche et sont utilisées comme critère de transfert modal. Dans l'étude la plus récente datant de 2020, il est montré que 24,6 % des trajets réalisés actuellement en transport motorisé lors d'une journée typique de semaine à Montréal pourraient être effectués à pied ou à vélo. La méthode pourrait néanmoins être enrichie en prenant en compte la pente des routes du trajet, l'électrification des vélos, les services de vélo-partage et la distance perçue par l'utilisateur.

Il existe de nombreuses mesures applicables dans les municipalités afin de favoriser l'usage de ces modes. Par exemple, à Montréal, plusieurs corridors importants sont piétonnisés chaque été, rendant les rues plus accueillantes pour les piétons et les cyclistes. De plus, le service de

vélo-partage est disponible toute l'année, même en hiver, grâce à une nouvelle flotte de vélos munie de pneus cloutés et de pédales antidérapantes.

1.1.3.2 Démocratisation du covoiturage

Un moyen de réduire le nombre de véhicules en circulation est d'encourager l'augmentation du taux d'occupation des véhicules privés. En 2018, à Montréal, le taux d'occupation moyen des véhicules légers privés par déplacement était de 1,2 personnes par véhicule (ARTM, 2020). Une méthode d'estimation du potentiel de covoiturage à Montréal a été présentée par H. Verreault et C. Morency, lors du 51e Congrès annuel de l'Association québécoise des transports (2016). Le potentiel est évalué point à point grâce à un algorithme permettant de jumeler les déplacements semblables en terme de zones d'origine et de destination et de plage horaire de départ. En prenant en compte les déplacements en auto-conducteur et auto-passager de l'Enquête Origine-Destination de 2013, ils ont pu estimer que le taux d'occupation global des véhicules pourrait augmenter de 1,23 à 1,28 dans la Grande Région de Montréal avec une baisse de 3,8 % des déplacements en auto-conducteur. Il existe donc un potentiel d'augmentation du covoiturage sur le territoire. Néanmoins, ils soulignent avec un scénario prenant en compte les déplacements en transport en commun que la hausse du covoiturage peut paradoxalement attirer des usagers des transports collectifs, et ainsi augmenter le nombre de déplacements en voiture. Favoriser cette pratique serait donc un bon complément pour décarboner les mobilités, mais cela doit se faire en complément de l'amélioration de l'offre en transports collectifs (Chaire mobilité, 2018).

Dans cette optique, depuis quelques années, plusieurs initiatives ont été lancées afin de chercher à augmenter la part de covoiturage au sein de la population. Dans un premier temps, il existe maintenant de nombreuses plateformes en ligne visant à faciliter le covoiturage, comme Amigo Express, Covoiturage.ca ou encore Covoiturage ARTM à Montréal. Covoiturage ARTM use notamment d'incitatifs financiers pour encourager le covoiturage, en particulier sur les liens interrives, tels que le pont-tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine et d'autres ponts majeurs entre Montréal et la Rive-Sud. Les conducteurs peuvent toucher jusqu'à

0,54 \$ par kilomètre, avec une rémunération qui augmente en fonction du nombre de passagers et du trajet choisi. Cela vise à désengorger ces axes stratégiques tout en favorisant le covoiturage (Gouvernement du Québec, 2023a). Des stationnements et des voies réservées aux covoitureurs existent également (Gouvernement du Québec, 2022). De plus, des entreprises proposant des services pour faciliter le covoiturage entre salariés ont émergé. Par exemple, le service québécois Netlift encourage une mobilité plus durable en simplifiant le covoiturage domicile-travail pour les employés (Netlift, 2024).

1.1.3.3 Composition des carburants

Les carburants fossiles, principalement l'essence et le diesel, dominent actuellement le secteur des transports, contribuant massivement aux émissions de gaz à effet de serre (GES).

Pour réduire l'impact environnemental du transport routier, des carburants alternatifs comme le biodiesel et le bioéthanol sont introduits. Au Québec, ces biocarburants sont déjà intégrés aux carburants traditionnels. Par exemple, l'éthanol est mélangé à l'essence, souvent à hauteur de 5 à 10 %, et provient majoritairement de cultures de maïs et de blé, bien que certaines productions utilisent des matières résiduelles. Le biodiesel, issu d'huiles végétales ou de déchets comme les graisses animales, est ajouté au diesel dans une proportion similaire. Ces mélanges réduisent les émissions de GES : les carburants à faible teneur en éthanol peuvent diminuer les émissions de 3 à 4 % par rapport à l'essence, tandis que le biodiesel peut réduire les émissions jusqu'à 80 % sur son cycle de vie, tout en limitant d'autres polluants tels que le monoxyde de carbone. Des mélanges avec des teneurs plus élevées, comme l'E85, peuvent réduire les émissions jusqu'à 70 %, mais nécessitent des ajustements mécaniques. (Gouvernement du Canada, 2024).

Cependant, ces carburants présentent des limites. Leur production peut entrer en concurrence avec les terres agricoles destinées à l'alimentation, posant des enjeux éthiques et environnementaux. De plus, leurs bénéfices en termes de performance et d'émissions varient selon les conditions d'utilisation et le mélange utilisé.

Pour encourager l'utilisation de ces carburants, le Québec a adopté en 2021 un règlement imposant une part minimale de 15 % d'éthanol dans l'essence et de 10 % de biodiesel dans le diesel d'ici 2030 (Gouvernement du Québec, 2023b). Parallèlement, des limites fédérales fixent une intensité maximale pour les carburants. À partir de 2030, les carburants essence ne pourront pas dépasser 81 gCO_{2e}/MJ et les carburants diesel 79 gCO_{2e}/MJ (Gouvernement du Canada, 2022).

1.1.3.4 Électrification de la flotte de véhicules

Une mesure extrêmement plébiscitée pour réduire les émissions de GES du transport est le remplacement progressif de la flotte de véhicules thermiques par des véhicules électriques. Si l'utilisation de ce type de véhicule permet de réduire drastiquement la consommation de carburants fossiles, il est important de souligner que cette mesure est plus efficace lorsque l'électricité utilisée est décarbonée. Au Québec, plus de 97 % de l'électricité est produite avec des énergies renouvelables grâce aux centrales hydroélectriques qui en produisent 95 % : la province a donc un fort potentiel de décarbonation via l'électrification. Le Québec est doté d'un Plan d'action en électrification des transports depuis 2011 et a sorti en 2020 son « Plan pour une Économie Verte 2030 – Politique Cadre d'électrification et de lutte contre les changements climatiques », un plan quinquennal dont l'objectif est d'accélérer l'électrification de la province, notamment en encourageant l'utilisation des véhicules électriques et en déployant un grand nombre d'infrastructures de recharge (Gouvernement du Québec, 2020).

En 2016, le Centre International de Référence sur Cycle de vie des produits, Procédés et Services (CIRAIG) a réalisé une analyse de cycle de vie comparative des impacts environnementaux potentiels du véhicule électrique et du véhicule conventionnel dans un contexte d'utilisation québécois. Le cycle de vie total des véhicules tient compte de la production des composants des véhicules ainsi que de la batterie, de leur transport, de l'utilisation du véhicule et de sa fin de vie. Bien que la production des composants des véhicules électriques ait une empreinte carbone plus élevée que celle des véhicules

conventionnels, après 150 000 km d'utilisation, une voiture électrique émet finalement 65 % de CO₂ en moins qu'un véhicule thermique. Pour tous les autres indicateurs, la voiture électrique a un impact plus faible (consommation de ressources fossiles, impact sur la santé humaine et sur la qualité des écosystèmes), à l'exception de la consommation en ressources minérales (CIRAIG, 2016). Il est à noter que cette étude exclut les VUS de son champ d'analyse ; ses conclusions ne sont donc pas valables dans un scénario de remplacement d'un petit véhicule essence par un VUS électrique. Selon de premières estimations, l'augmentation du nombre de véhicules électriques vendus à Montréal pourrait faire diminuer les émissions de GES du transport routier de la ville de 19 à 33 % d'ici 2030 par rapport aux émissions de 2006 (Dunsky, 2021).

Néanmoins, la littérature insiste sur le fait que l'électrification de la flotte de véhicules ne peut suffire à réduire les émissions de GES des transports (Winkler et al., 2023 et Sen et al., 2023). En effet, le renouvellement d'une flotte de véhicules à l'échelle d'une métropole est un processus très lent. Au Québec, l'âge moyen des véhicules augmente, passant de 7,2 ans en 2013 à 8,2 ans en 2021. Cette tendance limite le renouvellement de la flotte automobile (Chaire de gestion du secteur de l'énergie, 2023), d'autant plus que remplacer les véhicules trop tôt n'est pas envisageable : d'après Winkler et al. (2023), prolonger leur durée de vie est préférable d'un point de vue environnemental. Par ailleurs, l'électrification d'un nombre accru de véhicules requiert un nouveau dimensionnement du réseau d'électricité local et donc la construction de nouvelles infrastructures liées à la production et à la distribution d'électricité.

1.1.3.5 Écoconduite

Le mode de conduite a un impact important sur la consommation de carburant. Ainsi une conduite agressive, caractérisée par des accélérations et des freinages brusques, augmente les émissions de GES. De ce fait, un style de conduite plus doux et émettant moins de CO₂, l'écoconduite, est de plus en plus encouragé. De nombreuses études ont cherché à définir cette façon de conduire et à quantifier ses possibles gains sur la consommation de carburant. Mensing et al. (2014) ont par exemple identifié les trois principaux facteurs influençant

l'agressivité de la conduite : une meilleure stratégie de changement de rapport de vitesse, un meilleur choix des vitesses et une meilleure gestion de l'accélération. Parmi les règles courantes de l'écoconduite, il est par exemple recommandé d'éviter les vitesses élevées, de réduire le nombre d'accélération et de décélération en maintenant une vitesse constante et en relâchant l'accélérateur pour ralentir, d'enlever les poids superflus dans le véhicule et de ne pas attendre que le moteur chauffe avant de conduire (Berry, 2010). Le calcul d'une trajectoire d'écoconduite idéale montre que l'économie de consommation de carburant espérée pourrait être de 15 à 20 %. Néanmoins, ce résultat n'est pas atteignable pour une conduite humaine et des études expérimentales à petite échelle ont montré que ce gain serait plutôt de 5% par trajet (Rolim et al., 2014).

Des stratégies éducatives et technologiques renforcent la diffusion de l'écoconduite. Des modules de formation dédiés sont parfois intégrés directement aux formations au permis de conduire, comme au Québec ou en France. Une étude menée par Rolim et al. (2014) a d'ailleurs montré que l'éducation peut transformer les habitudes de conduite : après une session de sensibilisation à l'écoconduite, un groupe de conducteurs a réduit de 24 % les excès de vitesse et de 38 % les régimes moteurs excessifs, entraînant une diminution moyenne de 4,8 % de la consommation de carburant et une réduction des émissions de NOx de 8 %. Par ailleurs, des dispositifs embarqués, comme les régulateurs de vitesse et des indicateurs d'agressivité de conduite, peuvent permettre aux conducteurs d'ajuster leur comportement en temps réel (Mensing et al., 2014).

1.2 Modélisation du transport routier urbain et de ses émissions

Dans le cadre du projet de Carte Carbone, une méthode ascendante de calcul d'inventaire est utilisée. L'objectif est de calculer les valeurs des émissions de GES à haute résolution spatiale et temporelle, c'est-à-dire pour chaque rue et à chaque heure. Afin de tester l'impact de scénarios de mobilité sur une telle carte, il est nécessaire d'avoir recours à de la modélisation numérique. Plusieurs types de modèles existent : les modèles de circulation, permettant de calculer les trajectoires des véhicules d'un territoire donné durant une certaine période ; les

modèles d'émissions, servant à calculer les émissions de GES et de polluants associés à l'usage d'une flotte de véhicules ; et les modèles de choix modal, qui ont pour objectif de prédire quels modes de transport sont choisis par des individus réalisant un trajet.

1.2.1 Modélisation de la circulation

Dans le cadre du projet de Carte Carbone, la solution actuellement retenue consiste à utiliser un modèle de circulation routier couplé à un modèle d'émissions pour réaliser l'inventaire. En effet, la Ville de Montréal dispose de son propre modèle de circulation permettant de simuler la circulation d'un jour typique à l'heure de pointe. À partir de celui-ci, la circulation pour les autres jours de l'année est extrapolée et les données d'émissions sont ensuite calculées grâce à un modèle d'émissions. Le logiciel de modélisation de la circulation routière utilisé est AIMSUN car c'est sur ce logiciel que le Service de l'Urbanisme et de la Mobilité de Montréal (SUM) a construit le modèle. Des premières recommandations de modélisation pour la Carte Carbone ont été faites dans le mémoire de N. Stéphan (2023) : celles-ci sont détaillées dans les parties suivantes.

1.2.1.1 AIMSUN

Dans ce mémoire, la modélisation de la circulation est réalisée sur le logiciel *Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and non-urban Networks* (AIMSUN). Ce logiciel a été développé à l'origine par le *Transport Simulation Systems* de Barcelone en Espagne à partir des travaux du Professeur Jaume Barceló de l'Universitat Politècnica de Catalunya en 1997 (Barceló, 2010). Ses principales fonctionnalités incluent la gestion des réseaux de transport et la simulation dynamique des véhicules.

Sur AIMSUN, le réseau routier est découpé en sections. Une section routière désigne un segment de voie constitué de plusieurs voies adjacentes où les véhicules circulent dans une même direction. Le découpage du réseau en sections s'appuie généralement sur les caractéristiques physiques de la route. En milieu urbain, une section correspond souvent à la

portion de route comprise entre deux intersections, tandis que sur une autoroute, elle s'étend typiquement entre deux bretelles.

La principale donnée d'entrée d'un modèle de circulation est la demande de déplacements. Celle-ci correspond au nombre de véhicules sur chaque section de route et effectuant des virages aux intersections. Sur AIMSUN, celle-ci peut être renseignée par deux types de données. Les premières sont les « *Traffic State Models* », qui consistent à importer directement les flux observés à l'entrée des sections de route et aux intersections. Ce type de données d'entrée est généralement utilisé pour de très petites zones pour lesquelles une très grande quantité de données est disponible. La seconde possibilité est de renseigner la demande de déplacements grâce à des Matrices Origines-Destinations, qui sont des matrices décrivant les flux entre différents pôles de départ et d'arrivée du réseau routier. Il s'agit de tableaux dont les lignes représentent les zones d'origines, et les colonnes celles de destinations. Sur AIMSUN, les pôles d'origines et de destinations sont représentés par des centroïdes. Dans le logiciel, un centroïde n'est pas directement associé à des coordonnées géographiques. Il est en fait connecté à des sections, des nœuds, des stations et des arrêts de transport en commun, qui sont eux localisés spatialement (*Voir figure 1.2*). Un centroïde peut être connecté à un ou plusieurs de ces objets. Il peut être un pôle d'origine, de destination ou les deux.

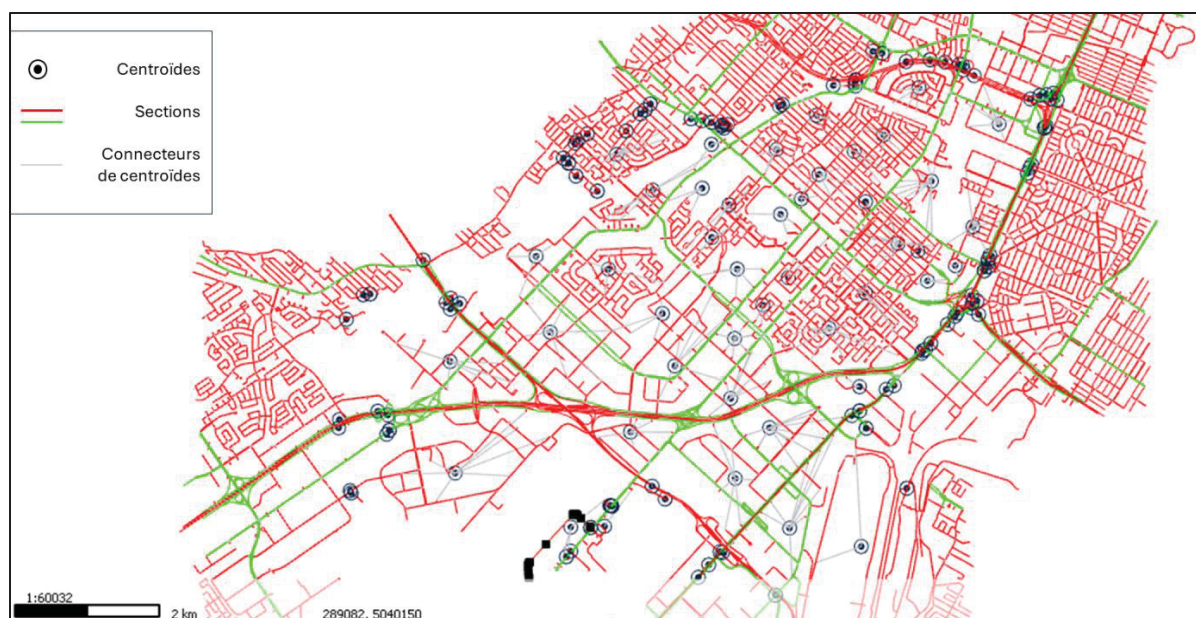


Figure 1.2 Modèle de circulation AIMSUN de l'arrondissement de Saint-Laurent du SUM
Adapté de AIMSUN (2024a)

Le logiciel AIMSUN permet de modéliser la circulation à trois échelles différentes : microscopique, mésoscopique et macroscopique. Des échelles hybrides existent, mais celles-ci ne sont pas étudiées dans le cadre de ce mémoire. Les simulations de circulation à l'échelle microscopique et mésoscopique s'appuient sur des affectations dynamiques des déplacements (*Dynamic Traffic Assignments*, ou *DTA*), tandis que celles à l'échelle macroscopique reposent sur des affectations statiques des déplacements (*Static Traffic Assignments*, ou *STA*) :

- A- L'échelle microscopique modélise chaque véhicule à chaque instant sur le territoire considéré. Il s'agit de l'échelle la plus précise et celle qui permet la meilleure prise en compte des comportements et des modes de conduite de la population. Toutefois, elle nécessite une grande quantité de données et les simulations sont très longues à calculer ;
- B- L'échelle mésoscopique modélise le déplacement de chaque véhicule mais ne calcule et n'enregistre les résultats qu'en entrée et en sortie de section de route. Cela a l'avantage de rendre la simulation plus rapide, mais moins précise en contrepartie ;

- C- L'échelle macroscopique est une échelle globale qui ne calcule pas le déplacement de chaque véhicule. Elle modélise les volumes d'automobiles par sections ainsi que les flux et vitesses moyennes sur celles-ci. Elle a donc l'avantage d'être bien plus rapide que les échelles précédemment évoquées. Toutefois, elle ne permet pas d'obtenir des résultats avec une précision spatio-temporelle.

Dans le logiciel AIMSUN, deux modèles d'affectation des chemins sont proposés au choix : le modèle *Dynamic User Equilibrium (DUE)* et le *Stochastic Route Choice (SRC)*. À partir des couples Origine-Destination de chaque véhicule de la simulation, ces modèles permettent de calculer les trajets empruntés par les véhicules.

Le modèle *DUE* repose sur une méthode itérative visant à atteindre un équilibre : pour chaque pas de temps et chaque matrice OD (Origine-Destination), les véhicules partant au même moment tendent à avoir un temps de trajet minimal et identique. Ce modèle suppose que les conducteurs connaissent parfaitement leurs itinéraires habituels sans s'adapter aux conditions de circulation en temps réel. Un indicateur, appelé "*Gap*", mesure la qualité de cet équilibre. Le "*Gap*" représente la différence entre le coût total des trajets réalisés (souvent proportionnel au temps de trajet réel) et celui des trajets les plus courts possibles. Par exemple, un "*Gap*" de 5 à 10 % indique que l'équilibre est considéré comme atteint lorsque les trajets simulés se rapprochent suffisamment des trajets optimaux. Cette méthode est idéale pour des réseaux routiers de grande taille car elle limite la congestion et offre des résultats robustes, mais elle est coûteuse en temps de calcul et en ressources informatiques.

La méthode *SRC*, quant à elle, repose sur une approche non itérative, simulant le comportement des conducteurs avec différentes manières de choisir une route. À intervalles réguliers (appelés *Route Choice Interval*), le modèle génère et met à jour des arbres de coûts reliant les points d'origine et de destination (centroïdes). Ces arbres servent à déterminer les itinéraires minimisant le coût des trajets pour chaque utilisateur. Contrairement à la méthode *DUE*, la méthode *SRC* utilise des fonctions de probabilité (binomiale, proportionnelle, Logit ou C-Logit) pour assigner les trajets, simulant une prise de décision basée à la fois sur des

éléments rationnels (comme le coût ou le temps) et une part d'incertitude ou de variabilité. Ce processus reflète une connaissance anticipée partielle des conditions de circulation, avec des conducteurs qui s'ajustent en fonction des prévisions. Bien qu'elle soit plus rapide et moins exigeante en puissance de calcul, la méthode *SRC* introduit davantage de variabilité dans les trajectoires simulées, ce qui peut engendrer plus de congestion (AIMSUN, 2024b).

Ce mémoire n'a pas pour vocation de faire une revue des différents modèles de circulation existants, puisque le choix du modèle et du paramétrage de la modélisation n'est pas à l'étude ici. Le lecteur pourra se référer au mémoire de N. Stéphan (2023) pour approfondir le sujet.

1.2.1.2 Modèle de circulation du MTMD

Le Ministère des Transports et de la Mobilité Durable (MTMD) dispose d'une plateforme de modélisation des transports pour la ville de Montréal, intégrant des modèles de prévision de la demande, des modèles d'affectation routière, d'affectation du transport en commun, de transfert modal et d'évaluation des émissions polluantes et des gaz à effets de serre.

- **Enquête Origine-Destination**

La principale donnée d'entrée de ces modèles est l'Enquête Origine-Destination. Il s'agit d'une enquête réalisée tous les 5 ans en automne auprès de 3,89 % des ménages de la Grande Région de Montréal, qui vise à dresser un portrait de la mobilité de ses habitants. Les participants, sélectionnés aléatoirement, sont invités à décrire les caractéristiques des déplacements effectués la veille par tous les membres de leur ménage âgés de 5 ans et plus, ainsi que les informations sociodémographiques de ces derniers, soit via un questionnaire en ligne, soit lors d'une entrevue téléphonique. Les données récoltées sont supposées représenter les déplacements typiques d'une journée de semaine d'automne sur le territoire de l'ARTM élargi aux municipalités alentour, pour un total de 158 municipalités (ARTM, 2022).

Des facteurs de pondération sont associés aux données de l'enquête afin que celles-ci soient représentatives de l'ensemble de la population étudiée. Chaque individu de l'échantillon se voit attribuer un poids en fonction de ses attributs sociodémographiques. Trois types de facteurs de pondération sont calculés, permettant de pondérer les données selon le nombre total de déplacements, de personnes ou de ménages (ARTM, 2022).

Les données brutes de l'Enquête Origine-Destination sont désagrégées, avec les coordonnées des lieux (origine, destination, lieu de domicile) renseignées dans deux systèmes de coordonnées : le MTM NAD 83, utilisé pour les régions du Canada, et le WGS 84, qui est un système global basé sur la latitude et la longitude. Pour chaque déplacement de l'enquête, les modes de transports utilisés et le motif de déplacement sont renseignés. Si le déplacement est bimodal, les coordonnées du point de changement de mode sont indiquées.

Dans ce mémoire, l'Enquête Origine-Destination de 2013 est utilisée comme base de données pour l'étude, car le modèle de circulation le plus récent développé par la Ville de Montréal repose sur ces données.

- **Le MOTREM**

Le modèle de simulation des transports routiers de la région de Montréal du MTMD se nomme le MOTREM. Il est mis à jour tous les cinq ans à partir des données de l'Enquête Origine-Destination. La version du MOTREM associée à l'Enquête OD de 2013 est le MOTREM13. Celui-ci est construit sur le logiciel de modélisation de la circulation EMME.

Le territoire modélisé dans le MOTREM correspond à l'ensemble du territoire couvert par les Enquêtes OD. Les données géographiques sont agrégées par zones. Celles-ci sont appelées les Zones d'Analyse Transport (ZAT). Dans le MOTREM, 1 757 ZAT sont définies (*Voir figure 1.3, p.30*). Les ZAT sont délimitées de manière à ne pas être traversées par des obstacles physiques majeurs, comme des rivières sans ponts ou des autoroutes sans accès direct. De plus,

leur territoire est défini pour être aussi homogène que possible en termes d'usage du sol (résidentiel, commercial, industriel) (MTMD, 2019).

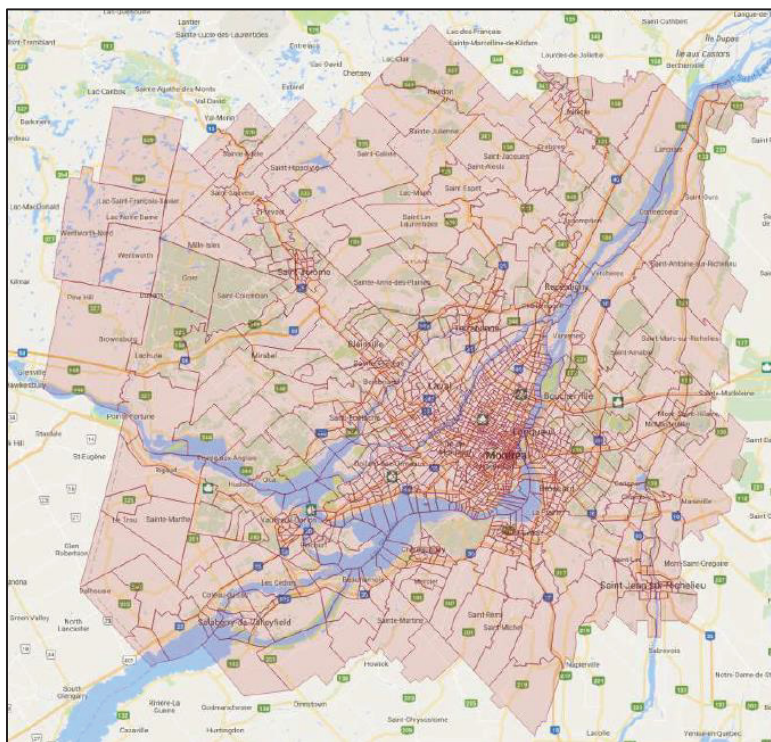


Figure 1.3 Territoire du MOTREM13

et son découpage en ZAT

Tirée du MTMD (2019)

Dans le logiciel de modélisation EMME, chaque ZAT est représentée par un centroïde, appelé un centroïde de zone. Dans le MOTREM, trois types de centroïdes se distinguent :

- A- Les centroïdes de zone : ils correspondent à une ZAT ;
- B- Les centroïdes de jonction : ils correspondent à des lieux où le changement de mode de transport est fréquent, comme les gares ou les stations de métro. Un centroïde de jonction n'est ajouté au MOTREM que si au moins 700 déplacements de l'Enquête OD déclarent un changement de mode à ce point ;
- C- Les centroïdes de périphérie : ils sont situés à la limite du territoire de la simulation et servent à représenter les déplacements qui débutent ou terminent à l'extérieur de celui-ci. Il y en a un pour chaque sortie et entrée de route du territoire modélisé.

Quatre classes de véhicules sont modélisées dans le MOTREM : les véhicules légers particuliers, les véhicules légers commerciaux, les camions réguliers et les camions lourds. Le réseau de transport en commun n'est pas modélisé. Les déplacements des véhicules sont décrits dans des matrices OD. Ces matrices sont calculées selon deux méthodes (MTMD, 2019).

Dans le cas des matrices des véhicules légers particuliers, celles-ci sont obtenues à partir de l'Enquête Origine-Destination. Les origines et destinations des déplacements réalisés en auto-conducteur, taxi et moto sont assignées à une ZAT, et donc au centroïde de zone qui lui est associé. Si le point d'origine ou de destination est situé à l'extérieur du territoire à l'étude, il est associé à un des centroïdes de périphérie. Pour les déplacements multimodaux, la partie réalisée avec les modes auto-conducteur, taxi et moto sont extraits et le point de jonction est associé au centroïde de jonction correspondant. Ensuite, les matrices sont calculées en considérant les facteurs de pondération associés à chaque déplacement.

Concernant les matrices des trois autres classes de véhicules, celles-ci sont plus difficiles à estimer étant donné que le MTMD ne dispose d'aucune donnée empirique permettant de les calculer directement. En effet, les données relatives au trafic commercial sont souvent considérées comme des informations privées, protégées par des clauses de confidentialité, ce qui limite leur accessibilité. De ce fait, le nombre de déplacements générés et attirés par la zone est estimé pour chaque ZAT en fonction de l'utilisation des sols et du nombre d'emplois. Une fonction gravitaire est ensuite utilisée afin de distribuer les différents déplacements sur le réseau.

Les matrices sont ensuite ajustées en fonction des comptages routiers effectués sur le réseau. Pour les véhicules légers commerciaux, en l'absence de données spécifiques pour cette catégorie, il a été supposé qu'ils représentent la différence entre les comptages observés et le volume simulé des véhicules légers particuliers.

Afin d'estimer la future demande en transport, la Direction de la modélisation des systèmes de transport du MTMD simule des scénarios prévisionnels dans le MOTREM en prenant en compte les grandes tendances démographiques de la région. Dans le cas du MOTREM13, des scénarios à horizon 2016, 2021, 2026, 2031 et 2036 ont été développés. Pour ce faire, les facteurs de pondération liés aux données des Enquêtes Origine-Destination sont réajustés en tenant compte des tendances socioéconomiques et démographiques. Ces projections tendanciennes sont calculées à partir de données de l'Institut de la Statistique du Québec de 2011 et d'un modèle de projection démographique appelé ES-3 développé à la Direction Économie, Prospective et Stratégie du MTMD.

Les différentes tendances prises en compte sont l'évolution de la démographie, l'évolution des statuts d'activité de la population, l'évolution de la motorisation, l'évolution du profil modal, l'étalement de la pointe de la période du matin et la dispersion des lieux d'emploi (Jarouche et al, 2018).

1.2.1.3 Modèle de circulation de l'arrondissement de Saint-Laurent

Le modèle de circulation utilisé dans cette étude est un modèle de circulation développé sur AIMSUN par la Ville de Montréal, limité au périmètre de l'arrondissement de Saint-Laurent. Le logiciel AIMSUN a été choisi par la Ville en raison de sa capacité à réaliser des simulations aux échelles microscopiques, mésoscopiques et macroscopiques à partir d'une même interface, et de sa rapidité à simuler la circulation à l'échelle municipale.

Dans ce modèle, la demande de déplacements est renseignée à partir de Matrices Origine-Destination. Ces matrices sont élaborées à partir de celles du MOTREM. Une première matrice « car » est composée de l'addition des matrices véhicules légers particuliers, véhicules légers commerciaux et camions réguliers. Une seconde matrice « camion » représente les déplacements des camions lourds. Les centroïdes du modèle sont construits de manière à correspondre à ceux du MOTREM.

Le modèle est ensuite calibré par le SUM à l'aide de données de comptage en simulation macroscopique. Un sous-réseau de l'arrondissement de Saint-Laurent est ensuite extrait du modèle régional. La matrice OD qui lui est associée est appelée une matrice traversale ; il s'agit de la matrice qui sera utilisée comme demande en transport de référence dans ce mémoire.

Lorsque le sous-réseau est extrait, de nouveaux centroïdes sont créés afin de modéliser les trajets entrants et sortants du réseau. Ces centroïdes de périphérie correspondent aux entrées et sorties de routes empruntées par les véhicules pour entrer et sortir de l'arrondissement. Sur AIMSUN, ces centroïdes de périphérie sont associés chacun à une ou plusieurs sections du modèle.

Dans son mémoire, N. Stéphan (2023) recommande l'utilisation de l'échelle microscopique pour la Carte Carbone. Néanmoins, l'échelle utilisée dans cette étude est celle mésoscopique car c'est à cette échelle que le modèle de circulation de l'arrondissement de Saint-Laurent a été calibré. Une calibration microscopique du modèle serait extrêmement coûteuse en temps et en données et n'est pour le moment pas envisageable. N. Stéphan compare également l'utilisation des modèles mésoscopiques *DUE* et *SRC* sur le modèle de circulation de l'arrondissement de Saint-Laurent et constate que les deux modèles permettent d'obtenir un trafic reflétant de manière satisfaisante la demande en transport. Néanmoins, elle recommande d'employer le modèle *DUE* dans le cadre du projet de Carte Carbone car ce modèle est plus adapté à la simulation de la circulation lors d'un jour de semaine classique en milieu d'année avec des conducteurs habitués à leur trajet. C'est donc ce modèle qui a été retenu pour cette étude.

Le modèle de l'arrondissement de Saint-Laurent utilisé dans cette étude repose sur le réseau routier et la demande en transport de l'année 2013, les versions ultérieures n'ayant pas encore été développées. Bien que ce modèle soit partiellement obsolète, il constitue une base pertinente pour tester et valider les méthodologies proposées dans le cadre de la Carte Carbone.

1.2.2 Modélisation des émissions

Une fois les simulations de circulation réalisées, il est possible d'estimer les émissions de GES correspondantes grâce à des modèles d'émissions. Il existe différents logiciels permettant de réaliser ces estimations et différents modèles pour les calculer.

1.2.2.1 MOVES

Le logiciel utilisé dans la présente étude est MOVES (*Motor Vehicle Emissions Simulator*), développé par l'*EPA*. Il s'agit d'un modèle numérique capable d'estimer les émissions de GES et de polluants et la consommation énergétique des véhicules. Ce logiciel est le plus utilisé en Amérique du Nord et l'est notamment par le MTMD. Ce modèle d'émissions a été choisi dans cette étude conformément aux recommandations établies par N. Stéphan dans son mémoire (2023).

MOVES ne calcule pas les émissions individuellement pour chaque véhicule, mais les estime par groupes de véhicules ayant des caractéristiques similaires. Ces groupes sont définis selon la vitesse et le *Vehicle Specific Power (VSP)*, qui correspond à la puissance spécifique du véhicule, c'est-à-dire sa puissance instantanée divisée par sa masse, exprimée en kW/t. Chaque catégorie est associée à un facteur d'émissions standardisé, en partant de l'hypothèse que des véhicules du même type, carburant et âge ont des facteurs d'émissions similaires (*EPA*, 2005).

MOVES couvre un large éventail de polluants, notamment :

- Les gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 , N_2O) ;
- Les polluants atmosphériques traditionnels (monoxyde de carbone, oxydes d'azote, particules fines, composés organiques volatils) ;
- Les émissions évaporatives et les polluants toxiques, tels que le benzène.

L'un de ses principaux avantages réside dans sa capacité à prendre en compte un large éventail de phénomènes d'émissions, comme celles liées à la combustion, à l'évaporation ou aux arrêts/redémarrages fréquents des véhicules (*EPA*, 2014).

Le logiciel permet également une grande personnalisation des données afin d'adapter la modélisation à un territoire spécifique. Les caractéristiques de la flotte de véhicules (type de carburant, motorisation, âge), le type de routes et les données météorologiques peuvent être modifiés pour refléter les conditions locales (EPA, 2014). Les cycles de conduite, qui sont des profils de vitesse représentant un comportement de conduite typique dans une région, peuvent également être personnalisés. Par défaut, MOVES utilise des cycles de conduite moyens correspondant à une ville américaine typique, mais il est recommandé que chaque région développe ses propres profils (Nouri, 2016 et Kishan et al., 2010). Grâce à l'outil « *Fuel Wizard* », il est possible de modifier facilement les compositions des carburants essence utilisés dans la simulation, lorsque ces mélanges ne sont pas inclus par défaut dans le logiciel. Ainsi, lorsqu'un utilisateur modifie l'un des paramètres de composition du carburant, comme par exemple le taux d'éthanol ou le niveau de soufre, cet outil estime les changements secondaires qui en résultent, en s'appuyant sur des données issues de modélisations de raffineries réalisées par MathPro, Inc. Ces modélisations intègrent des données du marché pétrolier et des biocarburants, notamment celles de l'*Energy Information Administration (EIA)* (EPA, 2023).

MOVES propose deux modes de calcul des émissions :

- Le mode inventaire : qui estime les émissions totales pour une période donnée et une région spécifique, en agrégeant les résultats par type de route ou de véhicule ;
- Le mode taux : qui fournit des facteurs d'émission spécifiques exprimés en fonction des conditions locales (par exemple, en g/km pour un type de véhicule et une vitesse moyenne donnée).

Ces options permettent de s'adapter à différentes intentions de modélisations, qu'il s'agisse d'évaluer les émissions globales ou de simuler des scénarios plus détaillés à haute résolution spatiale. De plus, trois échelles de modélisation sont disponibles : l'échelle nationale, l'échelle départementale et l'échelle locale (EPA, 2014).

1.2.3 Modélisation du choix modal

Une modification des infrastructures disponibles, l'augmentation de l'offre de certains modes de transport et la mise en place de nouvelles politiques sont autant de mesures qui modifient directement les choix de modes de transport des individus, appelé communément le choix modal. De ce fait, la modélisation de ce type de scénarios nécessite l'utilisation de modèles afin de déterminer leur influence sur la demande en transport pour chaque mode.

1.2.3.1 Modèle de choix modal

Un modèle de choix modal a pour objectif d'estimer la probabilité qu'un déplacement soit effectué avec l'un des modes disponibles parmi la liste des modes de transport considérés. Il redistribue les déplacements vers les modes selon leur probabilité d'utilisation, généralement calculée à l'aide de modèles statistiques. Il existe des modèles binomiaux, qui calculent la probabilité qu'un individu choisisse un mode parmi deux options et multinomiaux lorsque le nombre de modes considérés est strictement supérieur à deux. Le choix modal est généralement modélisé à partir d'un modèle de choix discret à utilité aléatoire de type Logit. Dans ce type de modèle, une fonction d'utilité est calculée pour chaque mode, et le mode ayant la plus grande probabilité d'être choisi est celui ayant maximisé sa fonction d'utilité (Eluru et al., 2012).

La complexité de la modélisation du choix modal réside dans le fait que le choix est ici influencé par de multiples facteurs humains difficiles à anticiper (Poliquin, 2012). Dans son mémoire, E. Poliquin distingue quatre types de variables qui l'influencent :

- Les variables de la personne : qui peuvent être intrinsèques à l'individu (genre, âge) ou extrinsèques à l'individu (possession d'un permis de conduire, d'un titre de transport, statut) ;
- Les variables du ménage : le nombre d'individus dans le foyer, le nombre d'enfants et d'adultes, la possession ou non d'un véhicule privé, le revenu du ménage ;

- Les variables du milieu bâti : la distance au centre-ville, la densité de population et d'emplois des quartiers, la mixité des usages, la connectivité et la tortuosité des rues, la distance d'accès aux transports en commun, la ruralité du milieu ;
- Les variables des déplacements : la distance, le motif du trajet, la chaîne du déplacement, sa durée, et l'accessibilité à des stationnements.

D'autres variables peuvent également avoir une grande incidence, comme le climat ou la dépendance à l'automobile.

L'incidence de de ces variables peut être très difficile à théoriser. Dans un modèle Logit, un coût de déplacement est calculé pour chaque mode de transport afin d'estimer son attractivité. Il est difficile de déterminer les paramètres à prendre en compte dans ce coût afin d'obtenir des résultats fidèles à la réalité. Une enquête menée auprès des membres de l'Université McGill conduite par N. Eluru et al. (2012) a permis de mettre en évidence l'importance de variables telles que le temps de trajet, le nombre de correspondances et le temps de marche dans le choix entre l'automobile et les transports en commun pour les déplacements pendulaires. C'est en général ce type de paramètres qui est pris en compte dans le calcul du coût, ainsi que des données sociodémographiques. Néanmoins, la grande difficulté de l'estimation d'un coût généralisé pour un déplacement est que celui-ci comprend une part de subjectivité : il n'est pas perçu de la même manière par toutes les personnes. Par exemple, certains individus préfèrent minimiser le temps de déplacement alors que d'autres préfèrent réduire le coût monétaire de celui-ci (Sicotte, 2014). Par ailleurs, la prise en compte d'un grand nombre de paramètres rend la calibration de ces modèles très complexe.

1.2.3.2 Méthodes alternatives

Comme les modèles de choix modal sont complexes, nécessitant un grand nombre de données et une calibration laborieuse, il peut être plus aisé d'utiliser un modèle de transfert modal. Ce type de modèle vise à représenter les échanges entre deux modes de transport en fonction de leur compétitivité relative dans un contexte donné. Les paramètres et hypothèses utilisés cherchent à évaluer l'intérêt pour un usager de passer d'un mode à un autre, en fonction des

conditions du scénario étudié. C'est ce genre de modèle qui est par exemple utilisé par le MTMD. Leur méthode repose sur la relation entre le ratio des parts modales du transport collectif et de l'automobile, et le ratio des temps de trajet pour ces deux modes. Celle-ci est déterminée empiriquement à partir des données des Enquêtes Origine-Destination (Martel-Poliquin, 2020).

Des estimations moins précises peuvent également être réalisées en calculant des potentiels de transfert modal. Golder Associés (2016) définit dans un rapport à l'intention de la STM une méthode standardisée afin de déterminer les émissions de GES qui ont été évitées par les transports en commun : un taux de transfert modal qui mesure la part des déplacements transférés de l'automobile au transport collectif est utilisé. Ce taux a été déterminé empiriquement à partir d'un sondage mené auprès de 1 200 utilisateurs du réseau de transport actif de Montréal. Les distances moyennes des trajets en transport collectif sont estimées à partir des données d'achalandage et converties en véhicules-kilomètres en appliquant ce taux, en tenant compte de l'occupation moyenne des voitures. Ce total est ensuite utilisé pour calculer les émissions de GES évitées en appliquant un facteur d'émissions par kilomètre. El Hajjaji (2020) s'inspire notamment de cette méthode pour estimer le potentiel de réduction d'émissions de GES de plusieurs futurs projets de transport en commun de Montréal, en utilisant une approche empirique. Grâce à la méthode précédente, elle calcule les impacts réels d'un projet de transport déjà réalisé et les extrapolent afin de prévoir les effets de nouveaux projets. Spécifiquement, c'est le prolongement de la ligne orange du métro à Laval en 2007 qui est utilisé comme référence dans son étude afin d'estimer l'impact de trois nouveaux projets de transport collectif dans l'est de la ville. Cette méthode est considérée valide, car les projets présentent des similarités en termes d'infrastructures et de services (ajout de stations de métro et tramway). Cependant, son application repose sur l'hypothèse que les populations affectées adopteront des comportements similaires. Des caractéristiques démographiques sont analysées dans le but de valider cette similarité.

Une autre méthode d'estimation du potentiel de transfert modal de l'automobile vers des modes plus durables a été conçue par Thomas et al. (2024). Un algorithme permettant de choisir le

mode de transport le plus efficace pour des déplacements spécifiques a été mis au point, en considérant des critères tels que la distance, le motif du déplacement, l'horaire et la disponibilité des véhicules. L'algorithme analyse des données existantes de caractéristiques de déplacements afin de déterminer des critères d'attribution de modes de transport. Chaque trajet est évalué pour identifier les modes de transport envisageables, puis le mode réalisable générant le moins d'émissions est attribué au trajet.

Comme expliqué en partie 1.1.3.1., Morency et al. (2014, 2020a) ont également développé une méthode d'estimation du potentiel d'usage des modes actifs à Montréal, se basant sur des critères de distance, d'âge, de genre et de structure de la chaîne de déplacements. Cette méthode peut être utilisée dans toutes les municipalités disposant d'une enquête de mobilité.

1.2.4 Notions de calibration

La calibration d'un modèle consiste à ajuster ses paramètres afin que les résultats simulés reflètent au mieux les observations réelles ou les données empiriques disponibles. Dans le cadre des modèles de circulation, d'émissions et de choix modal, la calibration est essentielle pour garantir la validité et la fiabilité des prédictions. Par exemple :

- Dans les modèles de circulation, la calibration consiste à ajuster les paramètres du modèle afin que les flux simulés à partir de la matrice OD reproduisent les comptages routiers observés ;
- Pour les modèles d'émissions, il s'agit d'ajuster les taux d'émissions selon les conditions locales (type de carburant, âge des véhicules, cycles de conduite typiques) pour refléter les caractéristiques de la flotte ;
- Dans les modèles de choix modal, la calibration vise à ajuster les sensibilités des usagers aux différents coûts et temps de transport pour que la répartition modale simulée corresponde aux enquêtes de mobilité.

Une calibration rigoureuse permet ainsi de minimiser les écarts entre les données réelles et simulées, assurant que les modèles soient représentatifs des conditions locales. Cela est crucial pour formuler des scénarios fiables et guider des décisions politiques urbaines basées sur ces modèles. Néanmoins, il peut s'agir d'un processus long et complexe, en raison du grand nombre de paramètres à ajuster et du manque fréquent de données empiriques pour certains d'entre eux. De plus, l'interdépendance entre les paramètres nécessite souvent de nombreuses itérations, rendant le processus encore plus exigeant. Ainsi, malgré son importance pour garantir la fiabilité des résultats, la calibration repose souvent sur des hypothèses ou des approximations lorsque les données disponibles sont limitées.

La question de la calibration des modèles ne sera pas abordée en détail dans ce mémoire. Toutefois, il est essentiel de souligner son importance, que le lecteur devra garder à l'esprit tout au long de ce document. Pour une analyse approfondie des enjeux de la calibration du modèle de circulation microscopique de la Ville de Montréal, le lecteur est invité à consulter le mémoire de N. Stéphan (2023).

1.3 Modélisation de scénarios de mobilité

De nombreux auteurs ont d'ores et déjà cherché à estimer l'impact de scénarios de mobilité sur les villes, que ce soit en termes d'émissions de GES, d'impact sur la santé des populations, de qualité de l'air, ou encore sur les habitudes de déplacement des individus. Une liste non exhaustive de ces études et de leurs caractéristiques est présentée en Annexe I, mettant particulièrement l'accent sur celles appliquées à la ville de Montréal.

Une grande diversité d'approches de simulation de scénarios de mobilité existe. Certains travaux portent sur des interventions localisées, comme la piétonnisation d'un corridor spécifique ou l'ajout de ralentisseurs sur une section particulière (Sider et al., 2014 ; Ghafghazi et al., 2014). D'autres adoptent une perspective plus systémique en évaluant l'impact de mesures touchant l'ensemble de la flotte de véhicules, telles que l'électrification ou les changements de carburants (Miotti et al., 2021 ; Gai et al., 2020).

Certains scénarios s'intéressent directement à la réduction des véhicules-kilomètres totaux (VKT), en testant l'impact de différents paliers de réduction. Ces études reposent sur des hypothèses précises concernant les économies potentielles de VKT selon les scénarios testés (Tu et al., 2018). D'autres approches examinent les possibilités de réduire les VKT via un transfert modal, en estimant le potentiel de déplacement de la demande actuelle vers des modes de transport alternatifs. Bien que ces travaux ne soient pas toujours associés à des politiques spécifiques, ils suggèrent que des mesures incitatives pourraient permettre d'atteindre ces potentiels (Thomas et al., 2024 ; Morency et al., 2020a).

Enfin, plusieurs études examinent l'impact de modifications de l'usage des sols, comme la relocalisation de ménages ou d'emplois, dans le but de réduire les VKT. Ces scénarios permettent d'évaluer les effets d'une redistribution spatiale des activités sur les déplacements (Wang et al., 2016 ; Morency et al., 2020b ; Saoudi Hassani, 2015).

Il existe donc une multitude d'approches permettant de faire de premières estimations des réductions d'émissions de GES pouvant être espérées en milieu urbain grâce à l'application de nouvelles politiques et mesures de mobilité durables. Néanmoins, certaines méthodes sont majoritairement utilisées. Notamment, le couplage d'un modèle de circulation avec le modèle d'émissions MOVES est très fréquent dans la littérature. Parmi les modèles de circulation, PTV VISUM (pour la modélisation mésoscopique) et PTV VISSIM (pour la modélisation microscopique) dominent, bien que d'autres outils comme AIMSUN soient également utilisés, notamment dans l'étude de Tu et al. (2018). MOVES, développé par l'EPA, reste le modèle d'émissions le plus courant et a été présenté en détail dans ce chapitre. Certains scénarios, comme l'ajout de ralentisseurs, nécessitent une modélisation microscopique, car ils influencent l'accélération des véhicules (Ghafghazi et al., 2014).

Les données nécessaires à ces modélisations proviennent majoritairement d'enquêtes de mobilité, telles que l'enquête Origine-Destination. Ces bases de données riches combinent statistiques de déplacements et données sociodémographiques des ménages, Néanmoins, cela

implique que tous les travaux ne traitent pas les véhicules commerciaux, faute de données disponibles. Pour les travaux spécifiques à la région de Montréal, plusieurs études s'appuient sur les facteurs de pondération du MTMD de l'enquête OD pour projeter l'impact des scénarios dans le futur. Cela permet de prendre en compte les évolutions de différentes variables socioéconomiques comme la démographie ou la motorisation (Smargiassi et al., 2020 ; Morency et al., 2020b).

Si certaines études analysent les émissions à l'échelle d'un corridor spécifique (Alam et al., 2014a), très peu abordent cette problématique à l'échelle d'un quartier entier avec une résolution spatiale élevée, où les résultats seraient désagrégés pour chaque section de route. Cependant, Alam et al. (2014a) ont calculé les émissions de GES sur plusieurs sections en utilisant des taux d'émissions par *Vehicle Specific Power (VSP)* dérivés de MOVES, montrant le potentiel d'approches plus fines grâce à l'usage de ce logiciel et d'un modèle de circulation.

Par ailleurs, quelques travaux combinent différents scénarios dans une même étude (Alam et al., 2014a ; Smargiassi et al., 2020). Cette approche est intéressante pour identifier des synergies entre mesures visant la décarbonation des villes. Cependant, les impacts des scénarios ne sont pas toujours cumulables, ce qui rend leur combinaison complexe. Des ajustements dans les modèles sont nécessaires pour refléter des interactions cohérentes et réalistes.

Il est également important de noter que la plupart des études ne se limitent pas aux émissions de GES. Elles examinent également d'autres impacts de la mobilité, comme les effets sur la qualité de l'air ou la santé des populations. Ces analyses multisectorielles enrichissent les conclusions et renforcent leur utilité pour la planification urbaine.

Ces différents travaux de recherche soulignent l'importance de standardiser les méthodes de modélisation des émissions de transport et de les rendre plus accessibles, afin de faciliter leur intégration dans les outils de planification et de sensibilisation. En effet, celles-ci présentent un fort intérêt pour la planification urbaine ainsi que pour la sensibilisation des populations à

l'impact du transport routier. Face à l'urgence de l'adaptation des villes et de leurs infrastructures de transport aux enjeux climatiques, il est crucial que ces résultats dépassent le cadre académique et soient mis au service des acteurs publics et de la société civile. Une meilleure accessibilité à ces résultats, appliqués à un territoire spécifique et regroupés dans un outil visuel en libre accès, permettrait la comparaison de différents scénarios de manière simple et efficace.

1.4 Objectifs

L'étude de la littérature a permis d'entrevoir la complexité de la modélisation de scénarios de transport pour une ville donnée. Dans ce contexte, l'objectif principal de ce mémoire est de développer un cadre méthodologique permettant de modéliser et de visualiser les émissions de gaz à effet de serre (GES) associées à différents scénarios de décarbonation du transport dans l'arrondissement de Saint-Laurent, en vue de leur intégration à l'outil numérique de la Carte Carbone de Montréal. Ce premier chapitre a permis de dresser une liste non exhaustive des mesures de réduction d'émissions de GES du transport urbain et de faire un état de lieux des outils de modélisation des transports et des émissions disponibles. De nombreux exemples de modélisations de scénarios de mobilité en Amérique du Nord, et plus particulièrement à Montréal, ont également été étudiés, mettant en évidence l'importance d'une approche standardisée et accessible non seulement pour une réponse plus efficace aux enjeux climatiques urbains de la part des acteurs publics, mais aussi pour sensibiliser les populations aux impacts du transport routier sur l'environnement.

Le premier objectif de ce mémoire est de définir les scénarios de mobilité modélisables sur la Carte Carbone, en fonction des données et des modèles disponibles. Cela inclut l'identification de critères permettant de classer les scénarios par typologie et méthode de modélisation. L'objectif est d'élaborer un cadre clair et répliquable permettant de choisir la méthode de modélisation la plus appropriée en fonction des caractéristiques du scénario.

Le second objectif est de développer des méthodes de modélisation adaptées pour quatre premiers scénarios, depuis le traitement des données d'entrée jusqu'à la visualisation des résultats à haute résolution spatiale sur la Carte Carbone. Ces méthodes doivent être paramétrées de façon à refléter la mobilité de la ville de Montréal.

Le dernier objectif est de développer un cadre de modélisation réutilisable et adaptable à d'autres scénarios de mobilité. Pour en faciliter l'application, un couplage efficace entre le modèle de trafic AIMSUN et le modèle d'émissions MOVES est recherché, notamment par l'automatisation du formatage des données afin d'assurer une transition fluide entre les deux outils.

Ces objectifs visent à établir un premier cadre de modélisation, capable de produire des résultats cohérents et personnalisés pour la ville de Montréal, tout en permettant la réplique et l'extension à d'autres contextes urbains.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

2.1 Principe général de la Carte Carbone

L'objectif de ce mémoire est de développer une méthodologie permettant de modéliser et visualiser les émissions de GES associées à différents scénarios de mobilité, dans le but de les intégrer à l'outil numérique de la Carte Carbone de Montréal. La principale contrainte est donc d'obtenir des résultats d'inventaire à haute résolution spatiale et temporelle. Pour ce faire, une première base de méthodologie pour le volet mobilité de la Carte a été envisagée en s'adaptant aux données de déplacements routiers disponibles à Montréal (*Voir* figure 2.1).

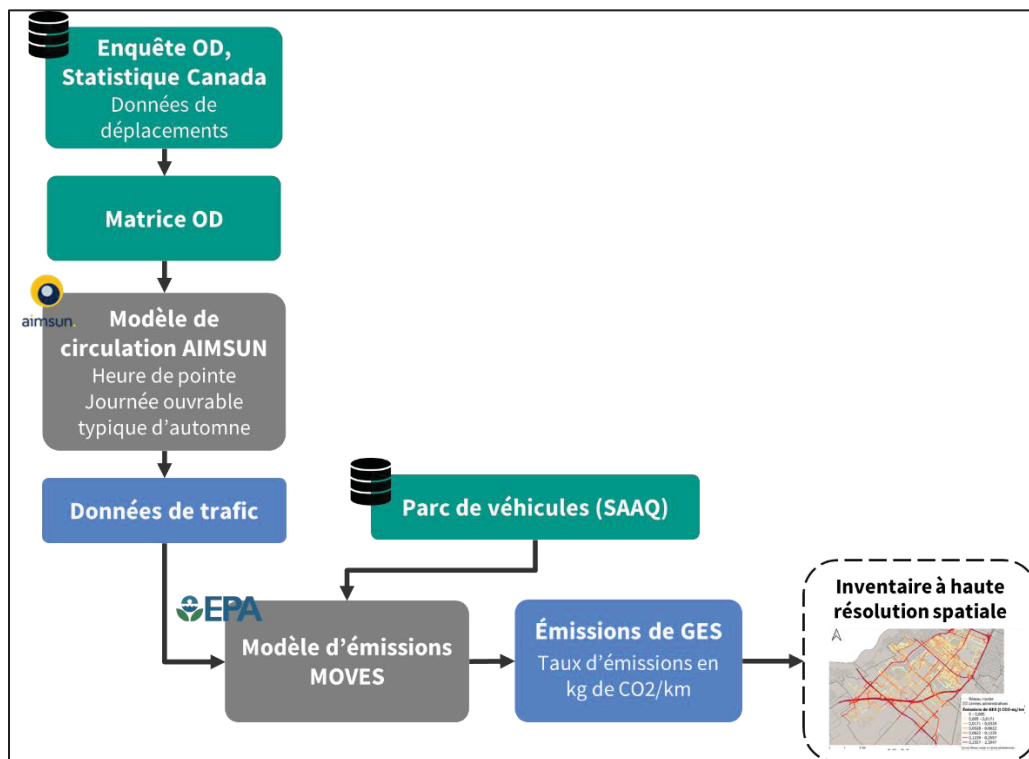


Figure 2.1 Méthodologie générale de l'inventaire à haute résolution spatiale du transport routier de la Carte Carbone

Cette première approche méthodologique s'articule autour de l'usage du modèle de circulation de l'arrondissement de Saint-Laurent, fourni par la Ville de Montréal et du modèle d'émissions MOVES, tel que recommandé par N. Stéphan (2023). Le modèle de l'arrondissement calcule la circulation pour les heures de pointe du matin et de l'après-midi pour une journée de semaine d'automne grâce aux données de l'Enquête Origine-Destination. L'Enquête Origine-Destination utilisée dans ce modèle est celle de 2013, puisque le modèle de circulation de l'arrondissement a été développé et calibré sur AIMSUN à partir de celle-ci.

Les données de circulation sont ensuite extrapolées temporellement, afin d'obtenir un inventaire couvrant l'ensemble de l'année et de la semaine à un pas de temps horaire. La méthode étant le sujet d'un mémoire en cours d'écriture, celle-ci ne sera pas approfondie ici. Toutes les modélisations réalisées dans ce mémoire sont donc seulement paramétrées pour une journée ouvrée typique d'automne 2013.

2.2 Périmètre de l'étude

L'étude entreprise dans le présent mémoire est effectuée dans les limites de l'arrondissement de Saint-Laurent, avec l'intention d'élaborer une méthodologie réutilisable pour l'ensemble des arrondissements de la municipalité de Montréal, voire pour d'autres municipalités.

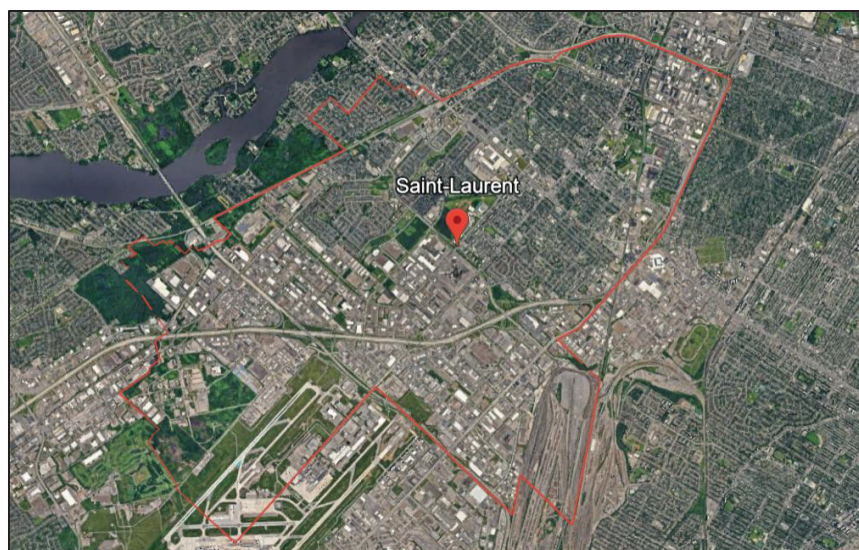


Figure 2.2 Périmètre de l'arrondissement de Saint-Laurent
Tirée de Google Earth (2025)

L'arrondissement de Saint-Laurent est un bon point de départ pour cette étude en raison de sa diversité et son dynamisme. Situé au cœur de l'île de Montréal et s'étendant sur 43 km², il bénéficie d'une position géographique stratégique avec une grande accessibilité aux réseaux autoroutier et de transport collectif, comprenant le REM, le métro, les bus et les pistes cyclables. Il est également traversé par les autoroutes 13, 15, 40 et 520. Regroupant les secteurs industriel, commercial, résidentiel et institutionnel, sa diversité permet d'analyser les comportements de mobilité de résidents, de travailleurs et d'étudiants. Avec une population de 103 000 habitants et 107 000 travailleurs quotidiens, l'arrondissement offre un bon échantillon des flux de déplacements urbains. De plus, Saint-Laurent est un pôle économique majeur avec le plus grand parc technologique du Canada, le Campus Saint-Laurent de Technoparc Montréal, et un réseau de 5 000 entreprises et commerces (Arrondissement de Saint-Laurent, 2017).

Enfin, l'arrondissement est engagé dans des initiatives de mobilité durable, telles que la promotion des transports actifs et collectifs, et la réduction des émissions de gaz à effet de serre, comme mentionné au chapitre précédent (Arrondissement de Saint-Laurent, 2017). Il serait donc pertinent, à l'avenir, d'observer l'impact de ces mesures à travers des données telles

que celles de l'Enquête OD. Cela permettrait de tirer des enseignements précieux pour la simulation et la mise en œuvre d'autres mesures planifiées par l'arrondissement.

Tout au long de cette étude, les caractéristiques de la flotte de véhicules utilisée au sein de l'arrondissement seront considérées comme analogues à celles de la municipalité montréalaise au complet.

Le modèle de circulation AIMSUN de l'arrondissement est composé de 43 centroïdes de zones, 139 centroïdes de périphérie et 4 centroïdes de jonction.

2.3 Typologies de scénarios et méthodes

Le premier objectif de ce mémoire est d'analyser et de classer les scénarios de mobilité par typologie, afin d'attribuer à chacun une méthode de modélisation préliminaire et d'identifier les principaux requis nécessaires à leur mise en œuvre. Cela permettra d'identifier quels scénarios sont modélisables à l'heure actuelle dans la Carte Carbone, en tenant compte des données et des modèles disponibles.

2.3.1 Typologies

En reprenant les typologies décrites par P. Nouri (2016) dans sa revue de littérature, trois principaux types de scénarios se distinguent :

- 1) Les scénarios visant à réduire le nombre de kilomètres parcourus par les véhicules motorisés, dits véhicules-kilomètres totaux (VKT) ;
- 2) Les scénarios visant à réduire les facteurs d'émissions des carburants utilisés par les véhicules motorisés en changeant leurs compositions ;
- 3) Les scénarios visant à réduire la quantité de carburant consommé durant les déplacements des véhicules motorisés.

Tous ces scénarios n'affectent pas les modélisations de la même manière. Notamment, certains requièrent de modifier le réseau de routes ou de transports en commun des modèles : par

exemple en ajoutant de nouvelles infrastructures routières ou en modifiant les règles de circulation. Les scénarios du premier type affectent directement la demande en transport et nécessiteraient donc un ajustement de la matrice OD dans le modèle de circulation. Les scénarios du second et du troisième type, quant à eux, modifient la quantité d'émissions de GES émise pour une même demande. Ils nécessiteront donc plutôt un ajustement des facteurs d'émissions et des caractéristiques de la flotte de véhicules considérée.

Pour chaque type de scénario, des sous-catégories ont été identifiées. En s'appuyant sur l'étude de la littérature existante, les principales approches de modélisation ont été définies pour chacune. L'objectif est de déterminer, dans la suite du projet, quels scénarios peuvent être modélisés sur la Carte Carbone et d'identifier les éléments manquants pour les autres.

Pour plus de clarté, les différentes typologies de scénarios ont été classifiées grâce à des arbres. Le premier arbre contient les scénarios visant à réduire le nombre de kilomètres parcourus par les véhicules motorisés (*Voir* figure 2.3, p.50), et le second les scénarios visant à réduire les émissions de GES des véhicules, regroupant à la fois ceux impliquant une réduction des facteurs d'émissions des carburants utilisés et ceux visant à réduire la quantité de carburant consommé durant les déplacements (*Voir* figure 2.4, p.51).

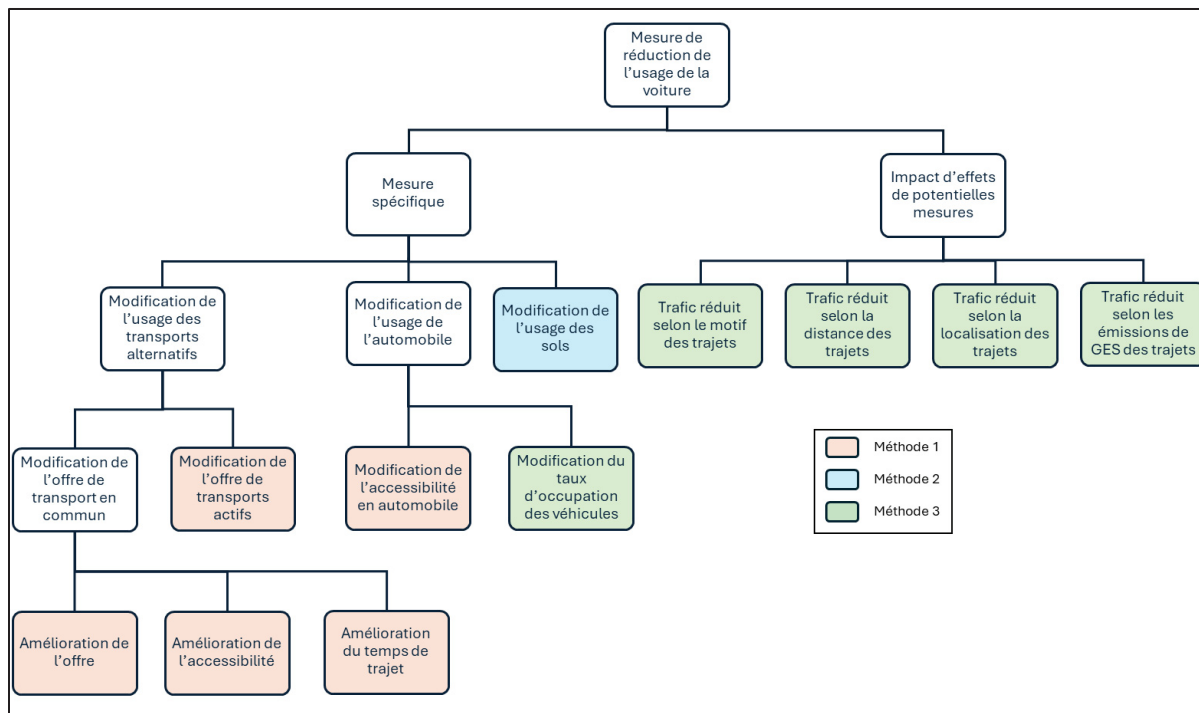


Figure 2.3 Arbre des différentes typologies de scénarios pour les scénarios du type « Mesure de réduction de l'usage de la voiture »

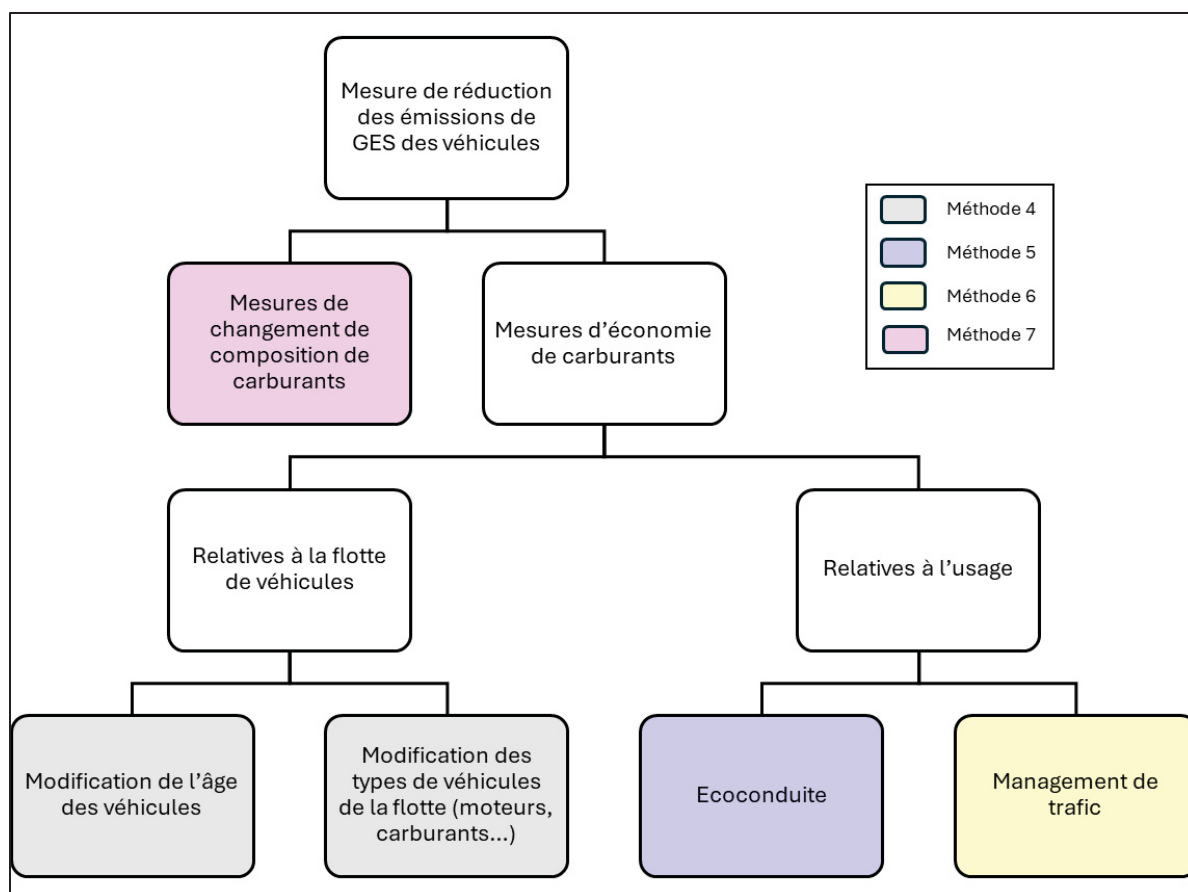


Figure 2.4 Arbre des différentes typologies de scénarios pour les scénarios du type « Mesure de réduction des émissions de GES des véhicules »

Ces deux arbres permettent de mettre en lumière les différents scénarios possibles et de les associer avec une méthode de modélisation. Dans la suite, une ébauche de chacune de ces méthodes sera dressée et leurs contraintes seront mises en évidence. Néanmoins, il est à noter que ces méthodes s'appuient sur l'étude de la littérature réalisée en partie 1.3. et ne sont pas exhaustives. D'autres alternatives pourraient être envisagées. L'objectif ici est plutôt d'identifier les plus classiques et de déterminer une manière de les intégrer à la Carte Carbone.

2.3.2 Méthodes

Les méthodes ci-dessous ont été esquissées en cherchant à les appliquer au cas spécifique où ces scénarios seraient modélisés sur la Carte Carbone. De ce fait, il est à noter que dans ce

mémoire, l'usage d'un modèle de circulation et d'un modèle d'émissions sera systématiquement recommandé dans les méthodologies puisque la contrainte principale de ce travail est la réalisation d'un inventaire à haute résolution spatiale. En effet, si les opérations sur les matrices Origine-Destination ne sont pas effectuées sur la matrice en entier de manière homogène et que l'objectif est de récupérer des statistiques de circulation précises (ex : vitesse moyenne sur chaque section de route), un modèle de circulation est nécessaire. De même, l'utilisation de MOVES s'avère essentielle dans ces travaux car elle permet une importante personnalisation des facteurs d'émissions et permet de calculer les résultats aussi bien à une échelle agrégée, en mode inventaire, qu'à l'échelle fine des sections de route, en mode taux. Toutefois, le lecteur notera que des estimations plus agrégées pourraient être réalisées sans ces modèles.

Comme vu précédemment, les scénarios peuvent être classés selon deux catégories principales : ceux cherchant à réduire l'utilisation des véhicules motorisés individuels et ceux cherchant plutôt à diminuer les émissions de GES émises par les véhicules. Pour la première catégorie, la modélisation de ces scénarios se traduira par une modification de la demande en transport, et donc dans ce cas-ci de la matrice Origine-Destination, en amont de la simulation de circulation. Pour les scénarios de la seconde catégorie, il s'agira plutôt de modifier les bases de données d'entrée du modèle d'émissions et éventuellement certains paramètres du modèle de circulation.

- **Méthode 1** « Modification de l'offre de transports en commun, modification de l'offre de transports actifs et modification de l'accessibilité en automobile » (*Voir* figure 2.5, p.54): la méthode 1 concerne des scénarios comme le prolongement de lignes de métro, la construction d'un réseau de tramways, la mise en place de pistes cyclables ou encore la piétonnisation de rues. Dans ce type de scénarios, le nombre total de trajets effectués entre chaque paire Origine-Destination reste constant ; c'est le mode de transport utilisé pour ces déplacements qui varie. En termes de modélisation numérique, cela nécessite de pouvoir coder les nouveaux éléments dans le réseau de transport et de réaliser une

affectation routière de chaque déplacement sur le nouveau réseau pour calculer leur coût en temps avec chaque mode de transport considéré.

Un modèle de choix modal permet ensuite de déterminer pour chaque déplacement quel mode de transport a le plus de probabilité d'être utilisé. Les étapes précédentes doivent être exécutées en boucle jusqu'à convergence de l'affectation routière. La matrice des trajets automobiles doit ensuite être recalculée ou ajustée pour représenter la nouvelle demande en transport. Si le scénario interfère avec le réseau routier, ce dernier doit être modifié dans le modèle de circulation pour prendre cela en compte. C'est le cas par exemple des piétonnisations de rues. Si la matrice Origine-Destination a été entièrement recalculée pour le modèle AIMSUN, elle doit être calibrée jusqu'à convergence du modèle.

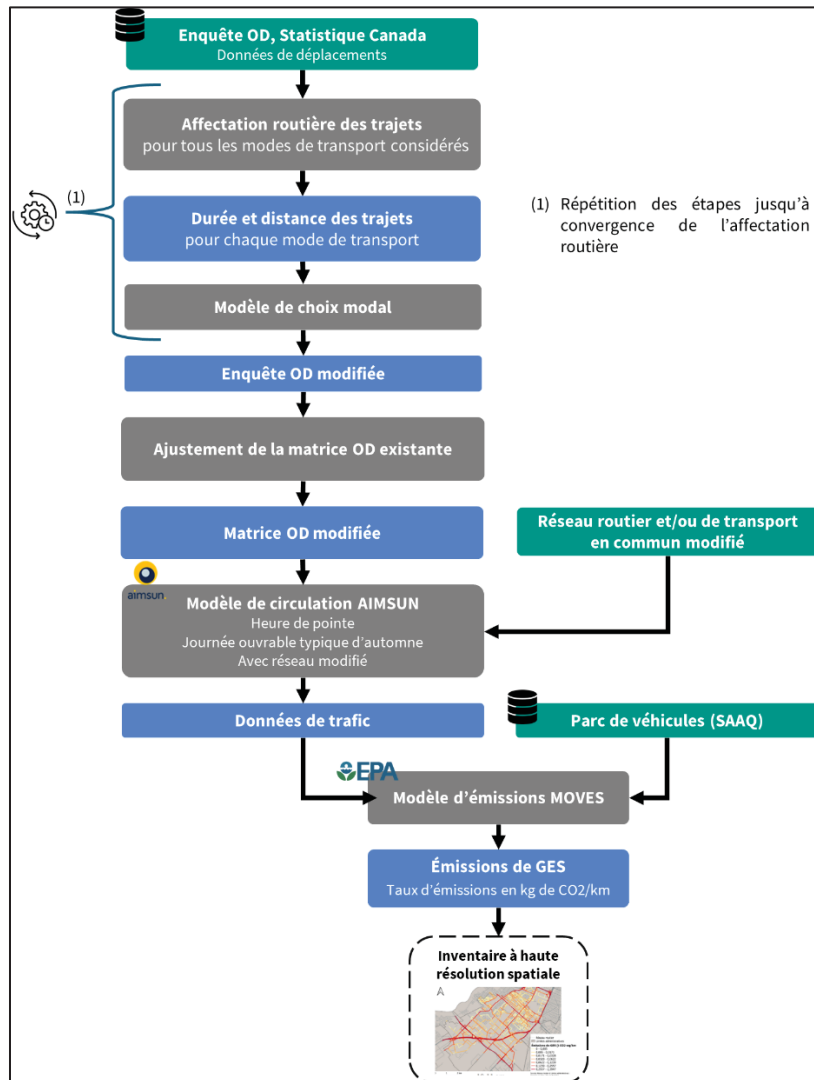


Figure 2.5 Schéma de la première méthode
« Modification de l'offre de transport en commun,
modification de l'offre de transports actifs et
modification de l'accessibilité en automobile »

- **Méthode 2** « Modification de l'usage des sols » : cette méthode repose sur une repondération de l'Enquête Origine-Destination, afin de réattribuer le poids relatif des pôles d'origine et de destination en fonction d'un nouvel usage des sols. Elle permet de

modéliser, par exemple, des scénarios de densification du centre-ville ou d'augmentation de l'emploi dans une zone spécifique.

Comme cela implique une modification des données désagrégées de l'Enquête Origine-Destination, il est nécessaire de recalculer entièrement la matrice OD. Celle-ci doit être recalibrée jusqu'à convergence du modèle de circulation. Pour répondre à l'enquête, différentes approches sont envisageables en fonction du type de scénario. Celles-ci ne feront pas l'objet de ce mémoire, mais trois d'entre elles sont exposées dans les travaux de Hassani (2015), Morency et al. (2020b), Smargiassi et al. (2020) et Wang et al. (2016). Il est par exemple possible d'utiliser le modèle de projection démographique ES-3 du Ministère du Québec.

- **Méthode 3** « Modification du taux d'occupation ou de possession des véhicules et application d'effets potentiels de mesures de mobilité » (*Voir figure 2.6, p.56*) : cette méthode repose sur l'utilisation d'hypothèses. Les effets de mesures affectant la mobilité des personnes sont estimés ou supposés : des trajets habituellement réalisés en automobile sont transférés à un autre mode ou éliminés selon différents critères. Par exemple, il peut être supposé que les trajets de moins de 600 m seraient transférés aux modes actifs si des mesures encourageant ces modes étaient déployées. De même, une plus grande pratique du télétravail au sein de la population pourrait par exemple mener à l'élimination de 20 % des trajets ayant pour motif « aller travailler » ou « rentrer du travail ». Par ailleurs, s'il est difficile de quantifier l'impact d'une mesure sur le taux d'occupation ou de possession des véhicules au sein de la population, il est cependant possible de faire le travail inverse : supposer une modification de ce taux et constater son impact sur les émissions de GES.

Pour ce genre de scénario, les paires OD de l'enquête Origine-Destination ne sont pas modifiées, mais les modes de transport utilisés peuvent varier et certains déplacements peuvent être supprimés. Il est de ce fait nécessaire d'ajuster la matrice existante en lui soustrayant les déplacements qui ont été retirés du trafic routier.

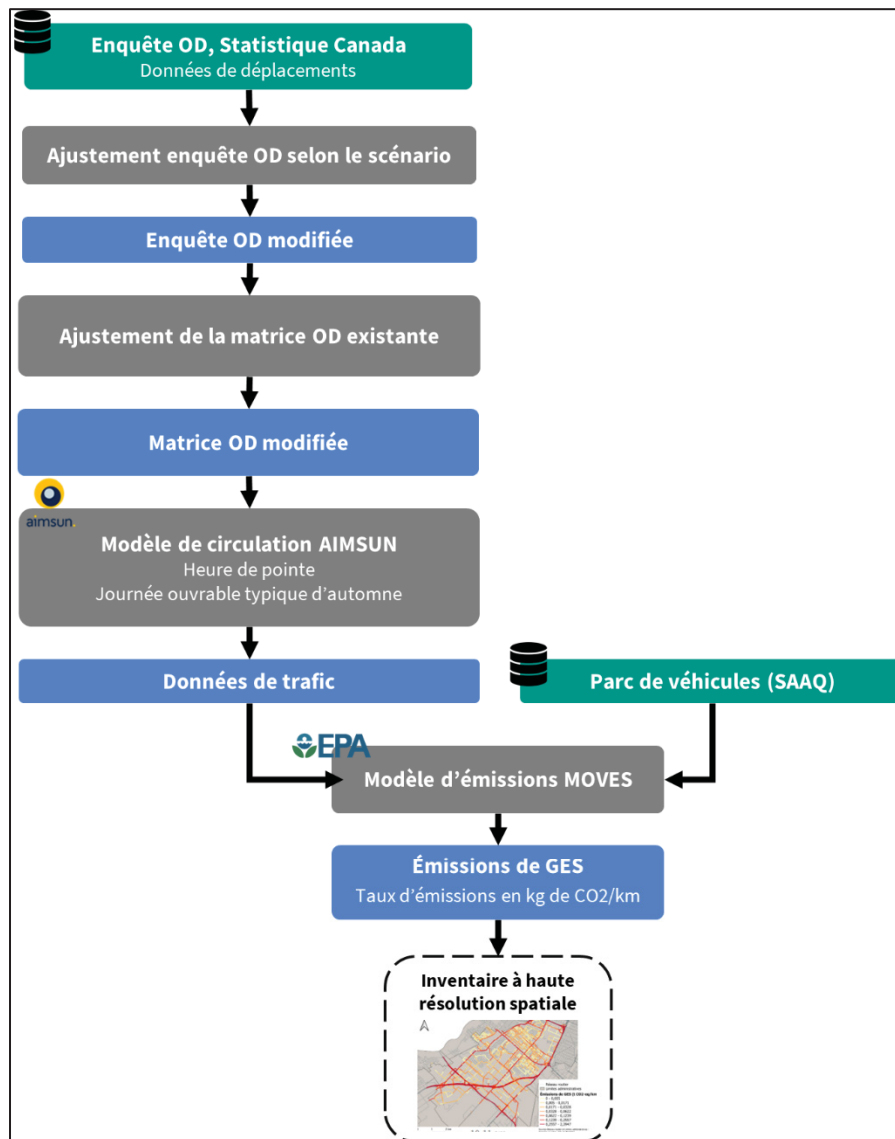


Figure 2.6 Schéma de la troisième méthode

« Modification du taux d'occupation de possession des véhicules
et application d'effets potentiels de mesures de mobilité »

- **Méthode 4** « Modification des caractéristiques de la flotte de véhicules » (Voir figure 2.7, p.57) : cette méthode s'applique dans le cas de scénarios de changements de caractéristiques de la flotte de véhicules. Il s'agit par exemple d'augmenter la part de véhicules électriques de la flotte ou de diminuer la part de véhicules anciens au sein

de celle-ci. Dans ce cas-là, toutes les étapes de modélisation, jusqu'à l'utilisation du modèle d'émissions MOVES, sont inchangées. Les modifications sont à retranscrire dans la base de données d'entrée de MOVES, dans les feuilles de calcul décrivant la flotte automobile comme « Age Distribution » ou « Fuel ».

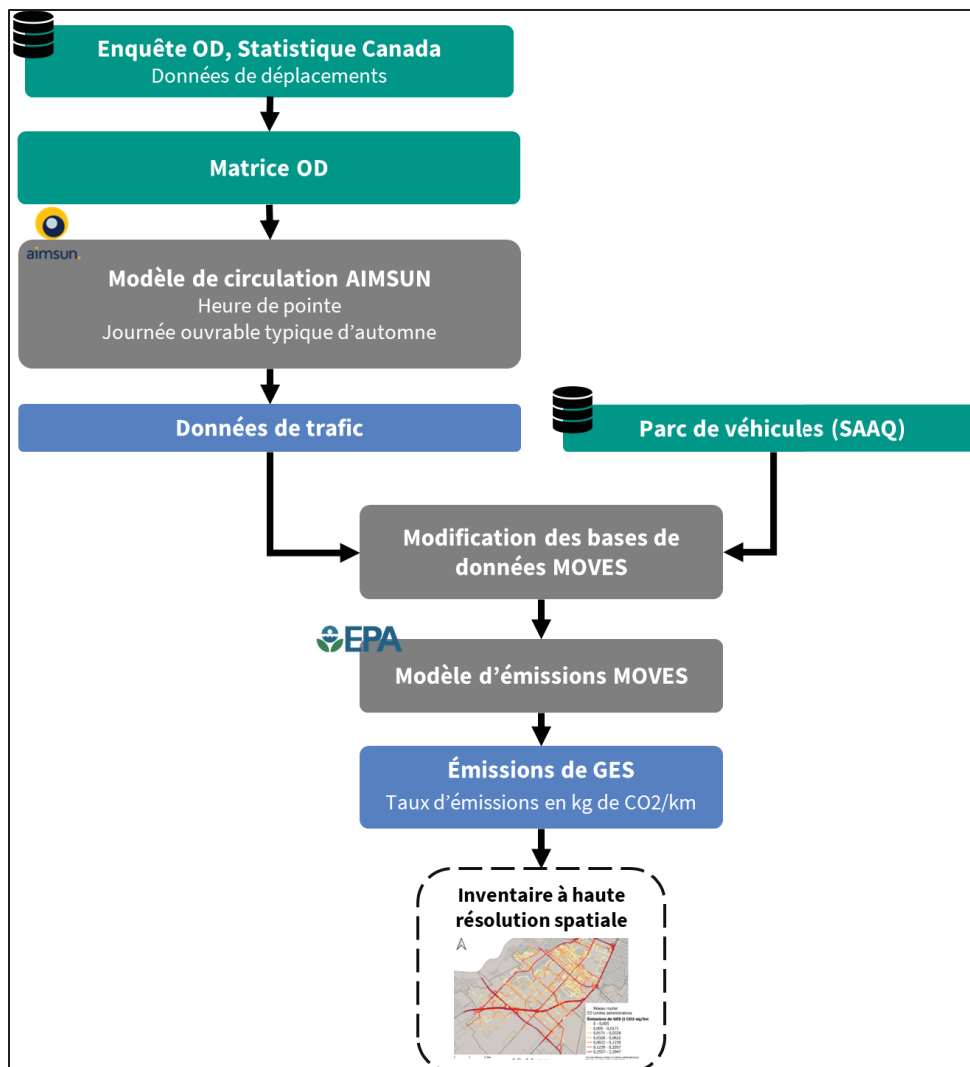


Figure 2.7 Schéma de la quatrième méthode
« Modification des caractéristiques de la flotte de véhicules »

- **Méthode 5** « Modification de la pratique de la conduite des usagers » : afin de simuler une pratique de la conduite différente au sein de la population, par exemple une conduite moins agressive de type écoconduite, il est nécessaire d'effectuer des

modifications à la fois dans le modèle de circulation et dans le modèle d'émissions.

Dans le cas du modèle de circulation, la modélisation doit s'effectuer à l'échelle microscopique. En effet, les autres échelles de modélisation ne permettent pas de tenir compte des paramètres d'accélération des véhicules.

Dans le modèle d'émissions, les changements de la pratique de la conduite impliquent de modifier les cycles de conduite par défaut du logiciel MOVES afin d'intégrer la modification dans la simulation. Cela nécessite dans un premier temps d'obtenir différents cycles de conduite typiques qui correspondent à la pratique de la conduite voulue. Il n'existe pas de méthode générale pour réaliser cela. La génération de cycles de conduite est un processus long, qui nécessite un grand nombre de données de conduite. Dans l'article de Miotti et al. (2021), cité au chapitre 1, les auteurs ont testé une méthode permettant de convertir des cycles de conduite classiques en cycles dits « écoconduite ». Cela pourrait être une première piste pour la modélisation de ce type de scénarios.

De nouveaux cycles de conduite peuvent être ajoutés à MOVES sur le logiciel HeidiSQL (logiciel de base de données téléchargé automatiquement avec MOVES) dans la table « Driveschedulesecond » et ces nouveaux cycles peuvent venir remplacer les cycles par défaut en modifiant la table « Drivescheduleassoc ».

- **Méthode 6** « Instauration de mesures d'apaisement et de gestion de la circulation » : les opérations d'apaisement et de gestion de la circulation comme l'ajout de dos d'âne ou de ronds-points peuvent être simulées en modifiant le modèle de circulation. La plupart de ces scénarios nécessitent l'utilisation de l'échelle microscopique. Cela demande également de modifier le modèle de circulation pour y implémenter la mesure correspondante. Dans AIMSUN, ce type de mesure peut être simulé à l'aide du module « Traffic Management ».

- **Méthode 7** « Modification de la composition des carburants » : la simulation de scénarios de modification de la composition des carburants est facilitée dans MOVES grâce à l'outil « *Fuel Wizard* ». Celui-ci permet de calculer rapidement des nouvelles compositions de carburant lorsqu'un des paramètres est changé. L'outil ne fonctionne que pour les carburants essence. Il est également possible de simplement augmenter ou diminuer la part de véhicules utilisant un certain carburant en modifiant l'onglet « avft » du tableur « *Fuel* ». Des modifications directement dans HeidiSQL sont également possibles en modifiant directement les bases de données d'entrée de MOVES. Ce type de scénario ne nécessite pas de changement dans les précédentes étapes de modélisation.

La modélisation de scénarios nécessite de simuler des actions qui auront lieu dans le futur, impliquant ainsi des changements dans les habitudes et les comportements de la population. Ces derniers devraient donc être pris en compte afin d'obtenir des résultats fiables. Par exemple, si le nombre d'habitants augmente avec les années à Montréal, cela signifie qu'un plus grand nombre de personnes souhaitera se déplacer à l'avenir. Cela peut donc impacter très fortement la circulation et par conséquent les émissions de GES associées. Pour ce faire, une solution est de repondérer l'enquête Origine-Destination, grâce aux facteurs calculés par le MTMD, mentionnés en partie 1.2.1.2. Cela nécessite donc une nouvelle matrice Origine-Destination avec les déplacements repondérés. Une solution à l'avenir pourrait donc consister dans l'utilisation de matrices repondérées calculées directement par le MTMD.

Le tableau de synthèse ci-dessous permet de rappeler les requis majeurs pour chaque méthode :

Tableau 2.1 Requis et contraintes majeurs par méthode

Méthode	Modèle de choix modal	Modification de la demande de déplacements	Modification du réseau du modèle de circulation	Modélisation de la circulation à l'échelle microscopique	Modifications des bases de données des véhicules du modèle d'émissions
1	Oui	Oui	Oui	Non	Non
2	Oui	Oui	Non	Non	Non
3	Non	Oui	Non	Non	Non
4	Non	Non	Non	Non	Oui
5	Non	Non	Non	Oui	Oui
6	Non	Non	Oui	Oui	Non
7	Non	Non	Non	Non	Oui

Lors de l'élaboration de scénarios de mobilité, il est important de noter que toute modification peut potentiellement influencer la demande en transport. Idéalement, un modèle de choix modal devrait être utilisé systématiquement pour refléter ces changements. Cependant, cette approche, bien que rigoureuse, complique considérablement le processus de modélisation en raison des nombreuses étapes de calibrage. Lorsque le scénario n'a pas pour objectif premier un changement sur la demande en transport, celle-ci peut être supposée constante pour simplifier le processus, ce qui est le cas dans les méthodes 4, 5, 6 et 7.

Dans le cadre des méthodologies 1, 2 et 3, comme la demande en transport est affectée, il est nécessaire de modifier ou de recalculer les matrices origine-destination (OD) des véhicules motorisés. Deux approches principales ont été envisagées :

- Recalculer la matrice OD dans son intégralité. Toutefois, adapter une nouvelle matrice au modèle de circulation AIMSUN utilisé dans cette étude s'avère complexe, notamment en ce qui concerne les trajets entrant ou sortant de l'arrondissement, qui nécessitent un calibrage.

Cette difficulté est encore plus marquée dans le cas de scénarios prospectifs, car il n'existe pas de données empiriques permettant de calibrer la matrice de manière fiable.

- Ajuster la matrice OD AIMSUN existante en soustrayant les trajets qui ont été éliminés ou transférés vers d'autres modes de transport.

À la vue des modèles et des données à disposition dans ces travaux, c'est la seconde approche qui a été utilisée pour calculer les résultats des scénarios à l'étude dans ce mémoire. L'algorithme utilisé et ses limites sont détaillés en partie 2.5.3.3. Par la suite, la méthode à privilégier est d'utiliser comme matrice de référence les matrices déjà calculées par le MTMD et le SUM et de les ajuster directement. Cependant cette méthode ne fonctionne pas pour la méthode 2 « Modification de l'usage des sols », puisque celle-ci implique une repondération des facteurs de l'enquête OD.

Comme les données relatives aux véhicules commerciaux ne sont pas des données empiriques et sont donc difficilement exploitables, les scénarios envisagés dans un premier temps ne concerneront que les véhicules légers particuliers. Néanmoins, certaines méthodologies pourraient être appliquées de la même façon à ce type de véhicules si des données de comptage exhaustives étaient disponibles.

2.3.3 Choix des scénarios étudiés

Comme vu précédemment, la modélisation d'un scénario complexe tel que l'ajout d'une nouvelle ligne de transport en commun demanderait de nombreuses étapes qui ne sont pas réalisables dans le cadre d'un projet de mémoire. En effet, à l'heure actuelle, il n'existe pas de modèle de choix modal calibré pour la Ville de Montréal. De plus, l'idéal serait de disposer d'un outil combinant modèle d'affectation de déplacements et modèle de choix modal afin de pouvoir lancer le modèle de choix modal directement sur une plateforme où le réseau de routes et le réseau de transport en commun pourraient être modifiés.

Ensuite, le modèle de circulation de l'arrondissement de Saint-Laurent utilisé dans cette étude n'est calibré qu'à l'échelle mésoscopique. De ce fait, seuls les scénarios ne nécessitant pas l'utilisation d'une échelle plus fine pour modéliser les accélérations et décélérations peuvent être simulés.

Certains scénarios nécessiteraient une étude à part entière, comme le scénario d'écoconduite. Celui-ci nécessite de générer de nouveaux cycles de conduite tout en retirant les composantes caractéristiques d'une conduite agressive. À ce jour, aucune méthode généralisée ou classique n'a été développée pour réaliser cela.

Au vu des données et des modèles disponibles dans le cadre de cette étude, seuls les scénarios de type 3, 4 et 7 feront l'objet de simulations dans ce mémoire. Parmi eux, les scénarios retenus sont :

- L'augmentation de l'usage des modes actifs ;
- L'augmentation de la pratique du covoiturage ;
- L'électrification de la flotte de véhicules ;
- L'usage de carburants moins émissifs.

Ces quatre scénarios permettent de balayer quatre approches différentes de modélisation.

Étant donné que ces premières modélisations sont effectuées sans modèle de choix modal, les scénarios visant à augmenter la pratique du covoiturage et l'utilisation des modes actifs - qui sont des scénarios impactant la demande en transport - ne fourniront pas de résultats précis. Ils permettront seulement d'estimer le potentiel maximal de transfert modal vers les modes actifs ou l'auto-passager pour les trajets actuellement réalisés en voiture individuelle. Cependant, cette estimation du potentiel maximal est intéressante car elle permet de déterminer la réduction théorique maximale possible grâce à certaines mesures, et ainsi de privilégier les projets offrant la plus grande marge de progression.

2.4 Méthode d’inventaire à haute résolution spatiale

Avant la modélisation des scénarios sur la Carte Carbone, il est nécessaire de mettre au point une méthode claire d’inventaire à haute résolution spatiale. Dans un premier temps, c’est le couplage du modèle de circulation AIMSUN et du modèle d’émissions MOVES qui a été choisi dans le cadre du développement préliminaire du projet. Cela nécessite donc de clarifier l’utilisation des deux modèles et leur usage combiné dans le but d’obtenir une carte visuelle des émissions de GES du transport routier de l’arrondissement de Saint-Laurent.

2.4.1 Modèle de circulation

Le modèle de circulation utilisé dans le cadre de cette étude est un modèle développé par le SUM de la Ville de Montréal sur le logiciel AIMSUN. Ce modèle représente le réseau routier de l’arrondissement de Saint-Laurent. Le modèle est utilisé en prenant compte des travaux réalisés auparavant par N. Stéphan (2023).

2.4.1.1 Paramètres de base

Dans cette étude, les simulations sont réalisées à l’échelle mésoscopique avec une affectation des chemins en *DUE*. La période de modélisation correspond au pic du matin de 7 h à 8 h pour une journée de semaine typique d’automne. Les modes de transport considérés sont les véhicules légers privés, les véhicules légers commerciaux et les camions.

2.4.1.2 Données en entrée

La principale donnée d’entrée du modèle est la demande en transport. Dans le modèle étudié ici, celle-ci est renseignée à partir de matrices Origine-Destination. Les matrices du modèle ont été calculées par le SUM à partir de celles du MOTREM. Dans le cadre de ce mémoire, seules deux matrices OD sont à disposition : il s’agit des matrices OD de 2013 des véhicules légers et des camions pour l’arrondissement de Saint-Laurent.

2.4.1.3 Données en sortie

Le logiciel AIMSUN permet de récupérer des données très détaillées de la circulation routière qui sont stockées en fin de simulation dans une grande base de données SQL. Dans le cadre de cette étude, les tables récupérées en sortie sont « MESECT », « MEVEHTRAJECTORY » et « MEVEHSECTTRAJECTORY » :

- La table « MESECT » contient des données statistiques sur les sections de route pour chaque période de la simulation ;
- La table « MEVEHTRAJECTORY » contient les informations relatives aux itinéraires des véhicules simulés pour toute la simulation ;
- La table « MEVEHSECTTRAJECTORY » contient pour chaque section de route les informations relatives à l'itinéraire des véhicules.

2.4.2 Modèle d'émissions

Le logiciel MOVES permet une grande personnalisation des données d'entrées de la simulation, permettant d'obtenir des résultats plus représentatifs de la réalité du territoire étudié.

2.4.2.1 Paramètres de base

Les paramètres de base de la simulation sont choisis directement sur l'interface du logiciel.

Tableau 2.2 Paramètres de base sur l'interface MOVES

Onglet	Paramétrage
<i>Scale</i> (échelle de la simulation)	<i>County</i> (comté)
<i>Time spans</i> (période de simulation)	Année 2013 – Octobre - Jour de semaine - 7h00 à 7h59
<i>Geographic Bunds</i> (zone géographique)	Vermont, Grand Isle County
<i>Onroad vehicles</i> (type de véhicules)	<i>Passenger car</i> (automobile)
<i>Road type</i> (types de route)	Toutes
<i>Pollutants and processes</i> (polluants et phénomènes considérés)	Consommation totale d'énergie et de CO ₂ atmosphérique

Le logiciel MOVES ne propose que des zones géographiques situées aux États-Unis. Le comté de Grand Isle, choisi pour sa proximité avec Montréal, a été sélectionné comme référence. Néanmoins, ce choix est peu impactant, car les caractéristiques de la flotte de véhicules sont personnalisées à partir des données spécifiques à la municipalité montréalaise.

Dans cette étude, MOVES a été paramétré comme si tous les véhicules de la simulation étaient des automobiles privées par souci de simplification. Toutefois, il est à noter que le logiciel permet de prendre en compte différents types de véhicules dans une même simulation. Pour la suite du projet, il serait nécessaire de différencier dans le logiciel les automobiles, les camions et les bus.

2.4.2.2 Données en entrée

Une fois les paramètres de base définis, il est nécessaire d'importer dans MOVES des feuilles de calcul contenant les données d'entrée de la simulation : les caractéristiques de la flotte de véhicules, les données de circulation de la simulation et des données météorologiques. Pour certaines des tables, MOVES propose des feuilles remplies par défaut. Les *templates* peuvent être exportés de MOVES et remplis sur un logiciel tableur.

Dans ce cas précis, les feuilles à remplir sont les suivantes :

Tableau 2.3 Données d'entrée des simulations MOVES

<i>Road Type Distribution</i>	<p>La proportion de distance parcourue par chaque type de véhicule sur les cinq catégories de routes suivantes : hors réseau, route rurale à accès restreint, route rurale à accès non restreint, route urbaine à accès restreint et route urbaine à accès non restreint.</p> <p>Source : calculée à partir des données de simulation AIMSUN</p>
<i>Source Type Population</i>	<p>Nombre de véhicules dans la simulation.</p> <p>Source : calculée à partir des données de simulation AIMSUN</p>
<i>Vehicle Type Vehicle Miles Travelled (VMT)</i>	<p>Distance totale parcourue pour chaque type de véhicules.</p> <p>Source : calculée à partir des données de simulation AIMSUN</p>
<i>Age Distribution</i>	<p>Proportion des véhicules par catégorie d'âge (0 à 30 ans et plus).</p> <p>Source : données de la SAAQ</p>
<i>Average Speed Distribution</i>	<p>Proportion de véhicules par type de route et type de véhicule, pour chaque heure de simulation, répartie selon les catégories de vitesses moyennes.</p> <p>Source : calculée à partir des données de simulation AIMSUN</p>

Tableau 2.3 Données d'entrée des simulations MOVES (suite)

<i>Fuel</i>	Distribution des types de carburants en station-service, composition des carburants, et fractions d'utilisation des différents carburants selon le type de véhicule, la catégorie d'âge et le type de moteur. Source : données de la SAAQ
<i>Meteorology Data</i>	Température et taux d'humidité pour chaque heure de simulation. Source : données climatiques historiques disponibles en ligne sur climat.meteo.gc.ca

2.4.2.3 Données en sortie

Dans cette étude, seules les émissions de CO₂ sont estimées. Néanmoins, il serait envisageable avec le logiciel MOVES de calculer les émissions d'autres polluants.

Les résultats peuvent être calculés de deux manières sur MOVES : en mode inventaire et en mode taux. Pour chaque simulation de scénario les deux modes sont utilisés. Le mode inventaire permet de calculer les résultats globaux de la simulation tandis que le mode taux est celui utilisé pour obtenir une haute résolution spatiale des résultats. Les résultats peuvent être obtenus au global, mais il est également possible d'obtenir la quantité d'émissions pour certains paramètres spécifiques par exemple pour un type de véhicules sur un certain type de routes uniquement. Le mode taux fournit des facteurs d'émissions par kilomètre parcouru, selon le type de route, le type de carburant et la catégorie de vitesse moyenne.

2.4.3 Couplage des deux modèles

Les résultats en sortie d'AIMSUN ne sont pas directement compatibles avec les fichiers d'entrée de MOVES. Dans le cadre de ce mémoire, un algorithme Python a été mis au point

afin d'automatiser le remplissage des feuilles de calculs d'entrée de MOVES à partir de la base de données de sortie d'AIMSUN. Celui-ci est disponible en Annexe II.

Cet algorithme prend en entrée l'année de simulation et la base de données de sortie de AIMSUN, à laquelle une table supplémentaire a été ajoutée au préalable contenant la correspondance entre les sections AIMSUN et les types de route MOVES. Les données en sortie de l'algorithme sont les sept feuilles de calcul remplies de sorte qu'elles n'ont plus qu'à être ajoutées dans l'interface MOVES.

2.4.4 Visualisation des résultats à haute résolution spatiale

Afin de visualiser les résultats à haute résolution spatiale, ce sont les résultats des simulations MOVES en mode taux qui sont utilisés. Un algorithme, disponible en Annexe III, a été écrit permettant de calculer les émissions de GES pour chaque section de route du modèle. Celui-ci prend en entrée les bases de données SQL de sortie de AIMSUN et de MOVES et une table associant à chaque section AIMSUN le type de route correspondant selon la classification MOVES.

Chaque section AIMSUN est associée à un facteur d'émissions en fonction de sa catégorie de route et de la vitesse moyenne des véhicules qui l'ont traversée lors de la simulation. Les émissions de GES sont ensuite calculées en multipliant ce facteur d'émissions par la distance totale parcourue sur la section.

Les données sont ensuite insérées dans QGIS pour les visualiser spatialement sur la carte de l'arrondissement. La visualisation des résultats n'est pas l'objet de ce mémoire, car les modalités de l'interface finale de la Carte Carbone n'ont pas encore été déterminées. Néanmoins, des cartes seront générées et présentées pour faciliter la lecture des résultats. Le lecteur doit garder à l'esprit que les visuels présentés dans ces travaux sont préliminaires et strictement académiques. Dans le futur outil de la Carte Carbone, une étude sera réalisée pour

intégrer les règles de la sémiologie à la carte et trouver les meilleurs moyens de communiquer ces messages.

2.5 Modélisation des scénarios sélectionnés

Une fois le cadre de base des modélisations installé, les méthodologies liées aux quatre scénarios choisis ont pu y être intégrées.

2.5.1 Scénarios d'électrification de la flotte de véhicules

Ces scénarios consistent à simuler l'augmentation de la part de véhicules électriques au sein de la flotte montréalaise afin d'en estimer l'impact sur les émissions de GES du transport.

2.5.1.1 Données

Les scénarios d'électrification de la flotte automobile montréalaise s'appuient sur les données du rapport "Diagnostic et modélisation de l'évolution du marché des véhicules électriques 2013-2030" de Dunsky Energy (2021). Dans ce rapport, des projections des ventes de véhicules électriques à Montréal sont estimées selon trois scénarios.

Tableau 2.4 Description des scénarios d'électrification à l'étude

Adapté de Dunskey Energy (2021)

Scénario	Description	Exemple de mesures clés
Scénario 1 (Projection modérée)	Engagements actuels et tendances récentes	Élimination des rabais VÉ d'ici 2025, 2 500 nouvelles bornes rapides
Scénario 2 (Projection accélérée)	Engagements améliorés et contexte mondial favorable	Élimination des rabais VÉ d'ici 2035 avec bonus-malus, bornes rapides suivant le ratio optimal
Scénario 2+ (Projection accélérée + mesures locales)	Politiques municipales renforcées	Accès bonifié à la recharge à domicile, Zones Zéro Émissions en centre-ville avec stationnements réservés aux VE

Les données utilisées incluent la projection du nombre annuel de véhicules électriques immatriculés à Montréal jusqu'en 2030, ainsi que la projection des ventes annuelles de véhicules légers pour les trois scénarios. Celles-ci sont exposées en Annexe IV et sont directement tirées du rapport de Dunskey Energy (2021).

Ces données ont permis de calculer, pour chaque année, la part des véhicules électriques parmi les nouvelles immatriculations. Le reste des ventes a été réparti entre les véhicules à essence et au diesel, en conservant la proportion observée lors de l'année de données la plus récente (2022).

2.5.1.2 Méthodes

La méthode consiste à modifier les caractéristiques des véhicules dans les bases de données d'entrée de MOVES. La table modifiée est la table « avft », dans l'excel « *Fuel* ». Cette table

présente la composition de la flotte de véhicules selon l'ancienneté des véhicules : pour chaque âge, elle indique la part des véhicules à essence, au diesel et électriques.

Dans ces trois scénarios, les simulations ont porté sur les potentielles futures flottes de véhicules montréalaises dans le réseau routier tel qu'il était en 2013, en prenant comme référence la circulation d'automne 2013. De ce fait, dans la table, les données projetées pour 2030 ont été renseignées pour l'année 2013 et les données des années précédentes ont de la même façon été décalées de 13 ans.

2.5.2 Scénarios de modification de la composition de carburants

Ce scénario consiste à modifier la composition des carburants sur MOVES.

2.5.2.1 Données

Dans ce mémoire, le scénario s'appuiera sur les réglementations québécoises. En effet, d'ici 2030, les carburants essence devront contenir 15 % de contenu à faible intensité carbone et les carburants diesel 10 %, conformément au Règlement sur l'intégration de contenu à faible intensité carbone dans l'essence et le carburant diesel.

Le Règlement sur l'intégration de contenu à faible intensité carbone dans l'essence et le carburant diesel prescrit l'intégration, dès le 1er janvier 2023, d'un contenu à faible intensité carbone de 10 pourcents dans l'essence et de 3 pourcents dans le carburant diesel. Ces proportions augmenteront graduellement pour atteindre 15 pourcents dans l'essence et 10 pourcents dans le carburant diesel d'ici à 2030. (Gouvernement du Québec, 2023b)

Dans le scénario simulé ici, la part d'éthanol des carburants essence sera augmentée pour atteindre 15 %. La part de biodiesel du carburant diesel restera inchangé, car sa modification n'est pas possible dans le « *Fuel Wizard* ».

2.5.2.2 Méthodes

L'outil utilisé est le « *Fuel Wizard* », disponible directement sur l'interface MOVES une fois la feuille de calcul « *Fuel* » importée. Les calculs d'ajustement de la composition du carburant sont effectués automatiquement par le logiciel.

2.5.3 Scénarios de modification des comportements de mobilité

Les scénarios impliquant une modification des comportements de mobilité des usagers engendrent une modification de la demande en transport dans le modèle de circulation. Il est donc nécessaire de déterminer dans l'enquête OD quels déplacements de la base de données seront impactés. Pour ce faire, un premier traitement préliminaire des données est réalisé.

Les données de l'enquête qui ne correspondent pas à des déplacements (refus de répondre, enfant de moins de 4 ans...) sont retirées, ainsi que les trajets n'ayant pas lieu entre 7 h et 8 h du matin. Les seuls trajets considérés sont les trajets pris en compte dans la demande en transport du modèle AIMSUN, c'est-à-dire tous les trajets utilisant au moins un mode motorisé individuel (auto-conducteur, auto-passager, taxi ou moto).

Si le trajet est multimodal, seule la partie du déplacement réalisée en véhicule motorisé individuel est extraite. Dans la base de données, les coordonnées des points de jonctions entre deux modes sont renseignées.

Pour un même ménage, les trajets qui ont la même origine, la même destination et le même horaire de départ sont ensuite repérés. Cela permet d'identifier dans quel véhicule étaient les individus du ménage voyageant en auto-passager dans le cas où ils voyageaient avec un ou d'autres membres du ménage. Les doublons sont supprimés, en ayant enregistré au préalable les caractéristiques de genre et d'âge des passagers pour l'auto-conducteur correspondant.

2.5.3.1 Potentiel des modes actifs

En reprenant la méthode de Morency et al. (2012, 2020a) une estimation du potentiel de l'usage des modes actifs dans l'arrondissement de Saint-Laurent a pu être développée.

Le principe est d'identifier les trajets actuellement réalisés en modes motorisés qui pourraient potentiellement être transférés à la marche ou au vélo. Pour ce faire, les trajets ont été choisis avec plus ou moins de contraintes.

La première contrainte considérée est que la distance du trajet ne dépasse pas une certaine distance seuil. Dans ce but, des distances seuils par tranche d'âge et de genre ont été déterminées empiriquement à partir des données de l'enquête OD : pour chaque catégorie d'individus, les trajets réalisés entièrement à vélo ou à pied ont été analysés pour en déduire à partir de quelle distance de trajet ces modes ne sont plus utilisés par la population locale.

Dans un premier temps, le potentiel de ce scénario a été estimé séparément pour chaque individu de l'enquête OD sans prendre en compte la présence d'éventuels passagers dans l'automobile. Comme les passagers sont possiblement d'une autre catégorie d'individus que le conducteur (par exemple dans le cas d'un parent qui emmène ses enfants à l'école), le potentiel de transfert aux modes actifs a été estimé dans un second temps en prenant en compte la distance seuil associée aux passagers. Ainsi, dans le cas où un véhicule comprend plus de deux personnes, la distance seuil la plus faible des passagers est considérée.

Dans un troisième temps, les chaînes de déplacement des individus ont également été prises en compte. En effet, il faut s'assurer que l'ensemble de la chaîne est réalisable en mode actif. Il est donc considéré ici qu'un trajet est réalisable en mode actif à partir du moment où chacun des trajets la composant est de distance inférieure à la distance seuil, mais aussi que la somme des distances de ces trajets est inférieure à quatre fois la distance seuil. Ce critère a été déterminé empiriquement par Morency et al. (2020a). Néanmoins, celui-ci peut être trop

contraignant car il serait possible au sein d'une même chaîne de déplacements de faire certains déplacements en modes actifs tout en utilisant son véhicule pour certaines portions.

Dans un dernier temps, le motif a été pris en compte. Les trajets dont le motif est de faire les courses ou de ramener quelqu'un peuvent être considérés comme irréalisables à vélo. Néanmoins, ce critère est à relativiser car pour des courses de taille moyenne, l'usage du vélo est tout à fait possible. De même, dans le cas où le motif est « ramener quelqu'un », il serait possible que les deux individus prennent le vélo ensemble.

Les potentiels du vélo et de la marche ont été évalués séparément. Pour simplifier l'algorithme, afin de considérer la combinaison des deux potentiels, l'hypothèse est faite que les trajets sont en priorité transférés à la marche puis au vélo.

- **Estimation des distances seuils**

Dans un premier temps, tous les trajets réalisés entièrement à pied et à vélo ont été extraits de l'enquête OD. Des catégories sociodémographiques basées sur l'âge et le genre ont été définies. Pour chacune, une distance seuil est définie. Pour ce faire, la distance Manhattan des trajets de l'enquête réalisés avec l'un de ces deux modes est déterminée. La distance Manhattan est calculée en sommant les distances absolues des coordonnées de deux points. En d'autres termes, c'est la somme des déplacements horizontaux et verticaux nécessaires pour aller d'un point à un autre (*Voir figure 2.8, p.75*).

La formule pour calculer la distance de Manhattan entre deux points (x_1, y_1) et (x_2, y_2) est :

$$d = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2| \quad (2.1)$$

Ce calcul de distance est assez adapté au cas des trajets dans les villes Nord-américaines pour lesquelles les rues sont généralement perpendiculaires et parallèles entre elles.

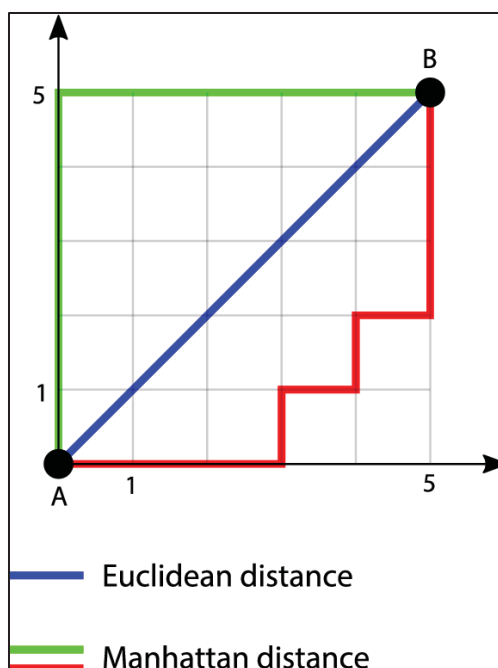


Figure 2.8 Exemple de distances
euclidiennes et Manhattan
entre deux points A et B
Tirée de Luu et al. (2020)

Le 80^{ème} percentile des distances est ensuite déterminé pour chaque catégorie sociodémographique. Celui-ci correspond à la distance seuil. Le choix du 80^{ème} percentile est un choix arbitraire de Godefroy et Morency (2012). Une étude de sensibilité de ce paramètre a été réalisée dans l'article « Estimating latent cycling and walking trips in Montréal » de Morency et al. (2020a).

- **Méthode de transfert modal aux modes actifs**

Une fois les distances seuils définies, les chaînes des déplacements sont également déterminées. Pour ce faire, il est considéré qu'une chaîne de déplacements débute lorsque l'individu quitte son domicile et se termine quand il y retourne. Les chaînes sont déterminées sur l'ensemble des données de l'enquête OD puisqu'il est important de bien prendre en compte les trajets de toute la journée. Si le tout premier déplacement de la journée d'un individu de

l'enquête démarre ailleurs qu'à son domicile, il est tout de même considéré que celui-ci correspond au début de la première chaîne de déplacements de l'individu. De même, si le dernier déplacement de la journée d'un individu de l'enquête termine ailleurs qu'à son domicile, il est considéré que celui-ci correspond à la fin de sa dernière chaîne de déplacements.

L'étape suivante est la sélection des trajets pouvant être transférés aux modes actifs, selon différents critères :

- **Critère 1** : distance seuil individuelle

Chaque trajet est associé à une catégorie de tranche d'âge et de genre, qui permet de lui attribuer une distance seuil déterminée précédemment. Les trajets dont la distance Manhattan est inférieure à cette distance est transféré au mode actif correspondant.

- **Critère 2** : distance seuil du véhicule au complet

Les distances seuils de tous les passagers du véhicule au complet est ensuite prise en compte. Parmi tous les passagers, la distance seuil retenue est la plus faible de toute, afin de s'assurer que tous les passagers puissent effectuer le déplacement en mode actif.

- **Critère 3** : chaîne de déplacement

Pour chaque déplacement, il est vérifié que tous les trajets composant la chaîne sont inférieurs à la distance seuil et que la somme des distances des trajets est inférieure à quatre fois la distance seuil. Seule la structure de la chaîne de déplacement du conducteur est considérée.

- **Critère 4** : motif du déplacement

Les déplacements à vélo pour lesquels les motifs sont « aller chercher quelqu'un », « reconduire quelqu'un » ou « faire les courses » sont supprimés.

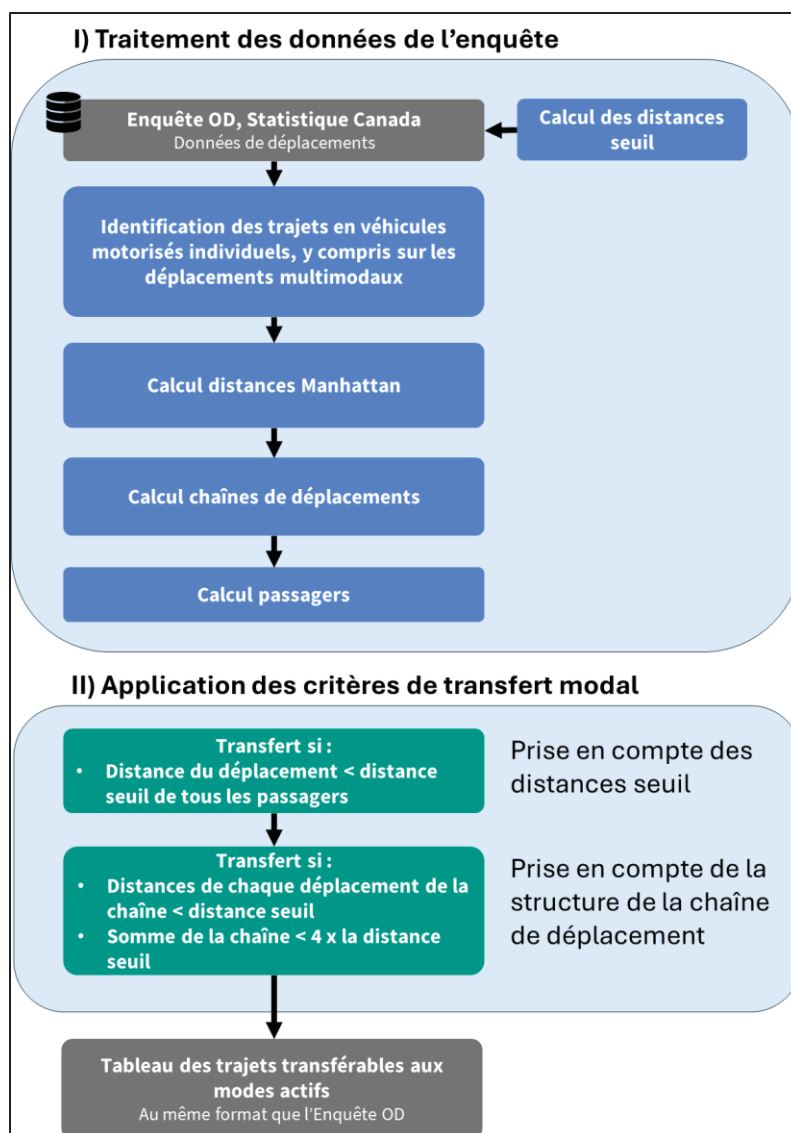


Figure 2.9 Schéma de l'algorithme du transfert aux modes actifs dans le cas du Scénario (C)

En se basant sur ces quatre critères, quatre variantes du scénario seront simulées :

- (A) Transfert uniquement selon distance seuil pour chaque déplacement séparément, ce qui suggère que si plusieurs passagers partagent un même véhicule, il est considéré qu'ils sont indépendants les uns les autres et que des conducteurs peuvent passer aux modes actifs bien que tous les passagers ne le puissent pas ;

- (B) Transfert avec prise en compte des distances seuils de tous les passagers du véhicule ;
- (C) Scénario (B) avec prise en compte des distances seuils de tous les passagers et de la structure de la chaîne de déplacements du conducteur (*Voir figure 2.9, p.77*) ;
- (D) Scénario (C) en considérant que certains trajets ne sont pas transférables au vélo pour certains motifs.

2.5.3.2 Potentiel de covoiturage

L'estimation du potentiel de covoiturage à Montréal à partir des données de l'Enquête OD s'appuie sur la méthode mise au point par H. Verreault et C. Morency, présenté lors du 51^e Congrès annuel de l'Association québécoise des transports (2016).

L'objectif est d'optimiser le remplissage des véhicules en identifiant les passagers pouvant covoiturer ensemble. Pour cela, chaque trajet se voit attribuer une zone spatiale (unité spatiale, US) ainsi qu'un intervalle de temps (unité temporelle, UT). Ces critères permettent de définir des marges de lieu d'origine et de destination ainsi que des plages horaires compatibles pour le covoiturage. Cette méthode suppose que la demande en transport reste constante malgré une augmentation du nombre de véhicules partagés. Il est également postulé que tous les auto-conducteurs et passagers sont enclins à covoiturer, peu importe le véhicule et peu importe le temps nécessaire à rejoindre le véhicule de covoiturage tant que celui-ci se trouve dans la même unité spatiale.

- **Traitement de l'enquête OD**

Chaque déplacement est associé à une unité spatiale d'origine et une unité spatiale de destination. Dans ce scénario, il a été décidé que le découpage des unités spatiales reprendrait celui des Zones d'Analyse Transport du MTMD. L'association des déplacements aux ZAT correspondantes est déterminée par leurs coordonnées de départ et d'arrivée. Un taux

d'occupation maximal des véhicules est défini. Par défaut, il est considéré que celui-ci est de cinq.

Pour chaque trajet, son unité temporelle est déterminée. Il s'agit de l'intervalle de +/- 20 min par rapport à son heure de départ.

- **Algorithme**

Il est considéré que les passagers de deux véhicules peuvent être mis en commun lorsqu'ils ont les mêmes US d'origine et de destination et que l'intersection de leurs intervalles UT est non-nulle.

Les véhicules sont regroupés par groupe de même US d'origine et de destination et triés par UT croissante.

Algorithme 2.1 Méthode de transfert des passagers des automobiles de l'Enquête OD afin de favoriser le covoiturage

Pour chaque véhicule i dans le groupe (trié par UT croissant) :

Vérifier si le taux d'occupation maximal (TOM) du véhicule i est atteint :

- **Si oui** : passer au véhicule suivant
- **Sinon** :
 - Chercher un véhicule j dans le même groupe (trié par UT croissant)
 - Vérifier si tous les passagers du véhicule i peuvent être transférés dans le véhicule j c'est-à-dire que la somme des taux d'occupation des deux véhicules est inférieure ou égale au taux d'occupation maximal et que l'intersection de UT_i et UT_j est non-nulle.
 - **Si oui** :
 - Transférer les passagers de i vers j
 - Mettre à jour l'UT du véhicule j pour qu'il corresponde à celui du véhicule i
 - Supprimer le véhicule i de la simulation.
 - **Sinon** : Passer au véhicule suivant dans le groupe.

Lorsque des passagers sont transférés d'un véhicule i à un véhicule j , l'UT du véhicule j prend la valeur de l'UT du véhicule i . Cela permet d'être certain que s'il reste des places dans le véhicule et que d'autres covoitureurs se rajoutent, leurs horaires seront toujours compatibles avec ceux des passagers partant le plus tôt.

Les véhicules vides sont retirés de la demande en transport et donc de la matrice OD.

Tableau 2.5 Exemple d'application de l'algorithme de transfert des passagers pour favoriser le covoiturage

Véhicule	Passagers	Taux d'occupation maximal	Unité temporelle	ZAT Origine	ZAT Destination
Avant transfert :					
i	1	5	[7h05 : 7h45]	A	B
j	2	5	[7h15 : 8h55]	A	B
k	1	5	[7h50 : 8h30]	A	B
Après transfert :					
i	0	5	[7h05 : 7h45]	A	B
j	3	5	[7h05 : 7h45]	A	B
k	1	5	[7h50 : 8h30]	A	B

Dans cet exemple, les UT des véhicules i et j sont compatibles ; leurs zones d'origine et de destination sont identiques et il y a assez de place dans le véhicule j pour accueillir les deux passagers du véhicule i. Les passagers de ce véhicule peuvent donc être transférés au véhicule j. Le véhicule i est donc supprimé de la demande en transport. Après transfert, l'UT du véhicule j est mis à jour pour celui du véhicule i. De ce fait, les passagers des véhicules j et k ne sont plus compatibles pour covoiturer puisque leurs UT ne se chevauchent plus.

2.5.3.3 Ajustement de la matrice OD

Une fois les véhicules à éliminer de la matrice OD déterminés, il est nécessaire d'ajuster celle-ci en conséquence. Pour ce faire, un algorithme a été mis au point.

- **Données d'entrée** (Voir figure 2.10, p.82) :
 - Tableau des déplacements transférés aux modes actifs ou éliminés, au même format et structure que l'enquête Origine-Destination de 2013 ;

- Couches géomatiques des centroïdes, de leurs connecteurs et des sections de route du modèle AIMSUN de l'arrondissement de Saint-Laurent ;
- Couche géomatique des ZAT de 2013 ;
- Couche géomatique des arrondissements de Montréal ;
- Couche géomatique des itinéraires routiers de l'Enquête OD 2013, calculés par la Chaire de la Mobilité : il s'agit des trajets les plus courts en voiture, estimés sur un réseau routier où les vitesses par défaut sont remplacées par des vitesses moyennes estimées à l'aide de données GPS, ajustées selon l'heure. Cette méthode reflète une situation de simili-congestion plutôt qu'une affectation en équilibre standard.

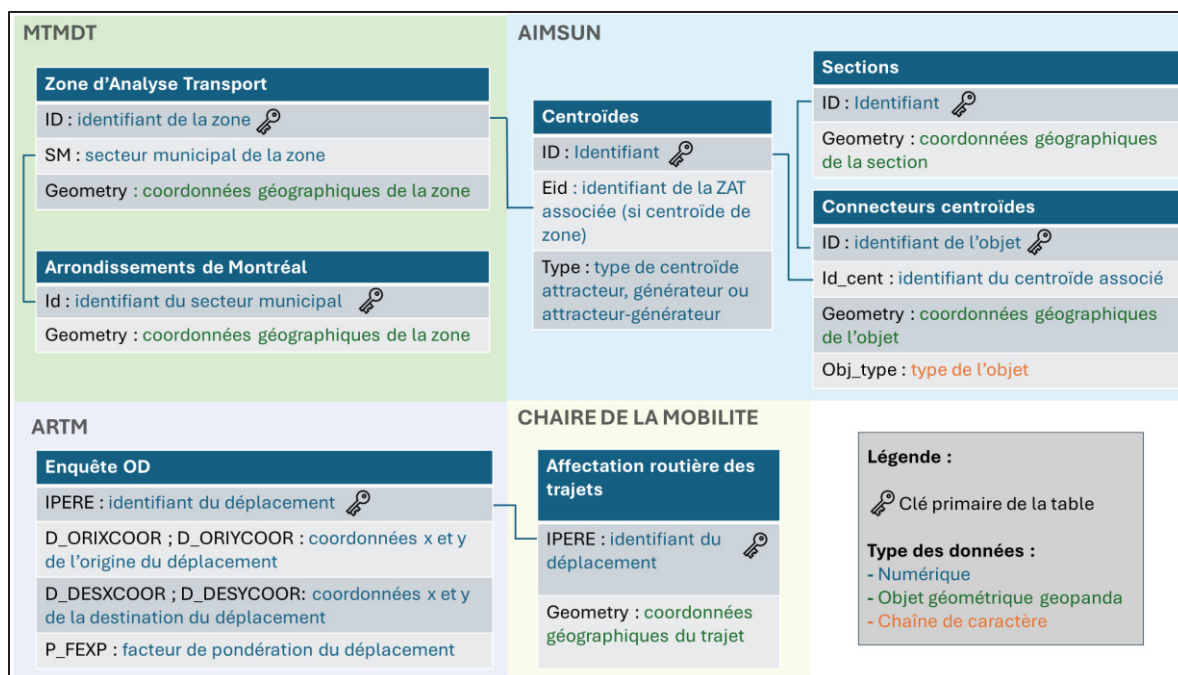


Figure 2.10 Liens entre les différentes données d'entrée de l'algorithme

Dans un premier temps, le fichier des déplacements est trié afin de ne conserver que les trajets se déroulant au sein de l'arrondissement de Saint-Laurent ou le traversant. Tous les trajets qui ont une intersection nulle avec les ZAT composant l'arrondissement de Saint-Laurent sont éliminés, car hors du périmètre de l'étude.

Ensuite, un centroïde est associé aux points d'origine et de destination de chaque déplacement. Deux cas sont à distinguer. Le modèle prend en compte tous les déplacements ayant lieu dans l'arrondissement : ceux débutant et terminant dans l'arrondissement, mais également ceux dont une portion du trajet s'effectue à l'extérieur de celui-ci. L'association point-centroïde ne se fait pas de la même manière selon le cas.

- A. Si le point est situé dans l'arrondissement, alors l'association à un centroïde est immédiate puisque chaque centroïde est associé à une ZAT dont les frontières géographiques sont connues ;
- B. Si le point est situé hors arrondissement, alors un centroïde de périphérie lui est associé. Pour ce faire, il est nécessaire de déterminer par quelle section de route le trajet entre et/ou sort de l'arrondissement. Cette opération est effectuée grâce aux données géomatiques des affectations routières des trajets ;
- C. Si le trajet est multimodal, le point où a lieu le changement de mode est associé au centroïde de jonction correspondant.

- **Détail de la méthode B :**

Un centroïde n'est pas localisé spatialement dans l'espace, ce qui rend plus difficile l'association des points aux centroïdes. Ces derniers sont associés à des objets appelés connecteurs ; dans le cas des centroïdes de périphérie, il s'agit de sections de route. Une section de route n'est associée qu'à un seul centroïde. L'objectif est de déterminer pour chaque trajet, par quelle section de route celui-ci est entré et/ou sorti de l'arrondissement, ce qui permet d'en déduire le centroïde d'origine et/ou le centroïde de destination correspondant.

Dans un premier temps, parmi toutes les sections de route du modèle AIMSUN, celles reliées à un centroïde de périphérie sont extraites et regroupées dans un nouveau tableau Python. Ensuite, pour chaque trajet traversant l'arrondissement, les sections intersectées sont identifiées. Pour identifier la section par laquelle un trajet entre et/ou sort de l'arrondissement, l'ordre d'intersection de chaque trajet avec les sections est analysé. Une fonction a été développée pour vérifier que l'intersection couvre une distance minimale, garantissant ainsi

que le véhicule suit bien la section sur plusieurs mètres plutôt que de la traverser brièvement. La première section traversée correspond au centroïde d'origine, tandis que la dernière correspond au centroïde de destination.

Cette partie de l'algorithme n'est pas infaillible et présente plusieurs limites. Tout d'abord, certaines sections sont très longues et peuvent, dans certains cas, dépasser les limites de l'arrondissement. Cela peut entraîner des erreurs si un véhicule circule sur l'une d'elles à l'extérieur de l'arrondissement mais entre ou sort finalement par une autre section. De plus, les sections AIMSUN et les trajets ne se superposent pas parfaitement, principalement parce que l'affectation routière des trajets a été réalisée sur un modèle différent de celui d'AIMSUN. Il est donc nécessaire d'appliquer une marge de tolérance sur les trajets, sans qu'elle soit excessive, afin d'éviter des confusions entre des sections très proches dans le modèle. Par ailleurs, comme l'affectation des points aux centroïdes repose sur des données d'affectation routière issues d'un modèle différent de celui utilisé dans cette étude, les trajets ne sont pas forcément assignés de la même manière sur le réseau, ce qui peut générer des incohérences dans les résultats.

Une fois les points associés aux centroïdes, chaque paire OD est soustraite de la matrice OD en prenant en compte le facteur de pondération qui lui est attribué dans l'enquête afin de prendre en compte son poids réel au sein de l'échantillon.

Cette méthode pourrait aussi être utilisée afin de calculer une nouvelle matrice OD si sa donnée d'entrée était le fichier de données désagrégées d'une des enquêtes OD. Néanmoins, comme expliqué précédemment en partie 2.3.2., il est préférable d'utiliser comme matrice de référence les matrices déjà calculées par le MTMD et le SUM et de les ajuster directement. Dans le cadre de ce mémoire, une seule matrice OD est à disposition : il s'agit de la matrice OD de 2013 pour l'arrondissement de Saint-Laurent. C'est donc à cette matrice que les trajets sont retirés.

2.6 Combinaison de scénarios

En général, calculer les gains de plusieurs scénarios de mobilité combinés n'est pas trivial. Les interactions entre les scénarios sont complexes et même individuellement, il est difficile d'estimer leur réel impact sur la demande en transport. Les gains ne sont donc pas forcément cumulables.

Dans le cas de cette étude, les gains des scénarios visant à réduire les émissions de GES émises par les véhicules sont cumulables avec ceux des scénarios visant à réduire la distance parcourue par des véhicules. Cela est possible car l'hypothèse est faite que la demande en transport reste constante dans les scénarios « Carburant » et « Électrification ». En réalité, il serait possible que des modifications liées à la technologie des véhicules impactent la manière dont les gens se déplacent au quotidien et donc la demande en transport. Si cela était pris en compte, il serait bien plus complexe de modéliser simultanément ces deux types de scénarios.

Dans le cas des scénarios « Modes actifs » et « Covoiturage », qui prennent en compte une modification de la demande en transport, celle-ci n'est prise en compte que dans une certaine mesure. En effet, l'impact sur les autres trajets n'est pas considéré. Dans la réalité, un transfert modal vers les modes actifs peut paradoxalement engendrer une stagnation du niveau de circulation car une diminution de la congestion peut encourager de nouvelles personnes à se déplacer en véhicule motorisé privé. La démocratisation du covoiturage pourrait aussi encourager des individus pratiquant les modes actifs à prendre plus souvent la voiture.

Il est donc très difficile d'anticiper quelles pourraient être les interactions entre ces différents scénarios dans le futur. Néanmoins, dans la continuité de la démarche de ce mémoire de déterminer des potentiels maximums de réduction, des scénarios ont été couplés ensemble afin de calculer leur impact cumulé maximal sur les émissions de GES. Pour ce faire, il a été considéré que les trajets motorisés seraient transférés en priorité à la marche, puis au vélo et enfin au covoiturage. Quant aux scénarios « Carburant » et « Electrification », n'ayant pas

d'impact direct sur la demande en transport dans ce mémoire, ils peuvent être directement pris en compte dans les combinaisons.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

3.1 Simulation de référence

La première étape de ce travail est de simuler la circulation de référence de l'Enquête Origine-Destination 2013 sans scénarios de réduction d'émissions de GES. Pour rappel, il s'agit des trajets traversant l'arrondissement de Saint-Laurent entre 7 h et 8 h lors d'une journée de semaine d'octobre 2013.

Afin de mieux constater par la suite l'impact des différents scénarios sur la circulation, il est intéressant de dresser un portrait de référence de la mobilité des usagers. Les parts modales et les taux d'occupation indiqués dans ce chapitre sont calculés en nombre de déplacements.

Tout d'abord, les déplacements sont majoritairement effectués en véhicule motorisé individuel avec une part modale de 78 % dans l'arrondissement de Saint-Laurent à l'heure de pointe (*Voir figure 3.1, p.88*). Le taux d'occupation moyen par déplacement de ces véhicules sur le territoire de l'Enquête OD entier est de 1,32 passagers et de 1,20 passagers sur le périmètre de la simulation. Il peut être constaté que dans l'arrondissement la marche est bien moins utilisée que sur le territoire complet de l'Enquête OD, puisque sa part modale n'est que de 3 % contre 11 % sur le territoire au complet.

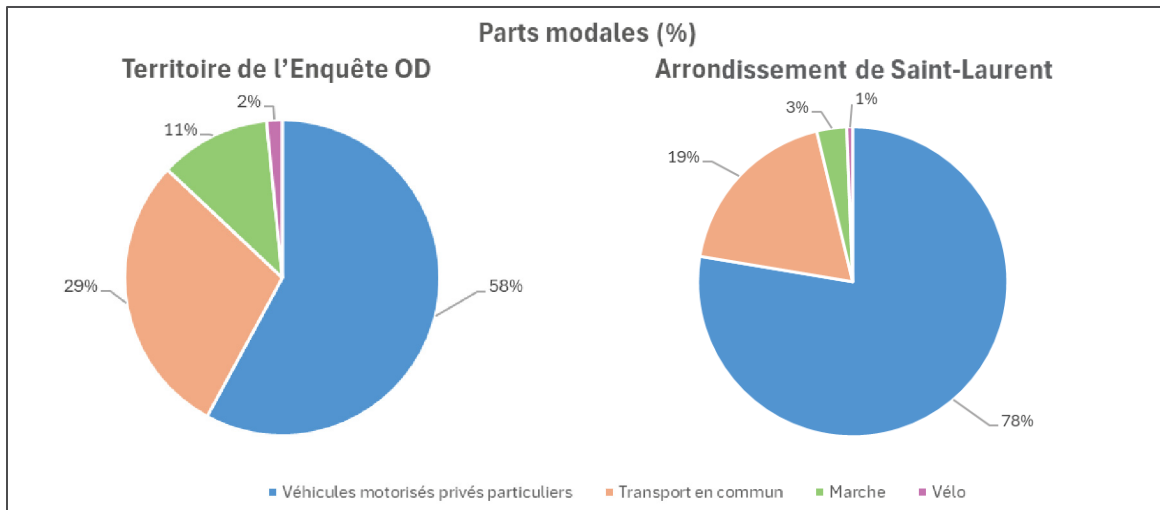


Figure 3.1 Parts modales des déplacements dans la simulation de référence

En 2013, seulement 0,05 % de la flotte montréalaise était à moteur électrique. Le carburant majoritairement utilisé était l'essence (*Voir figure 3.2*).

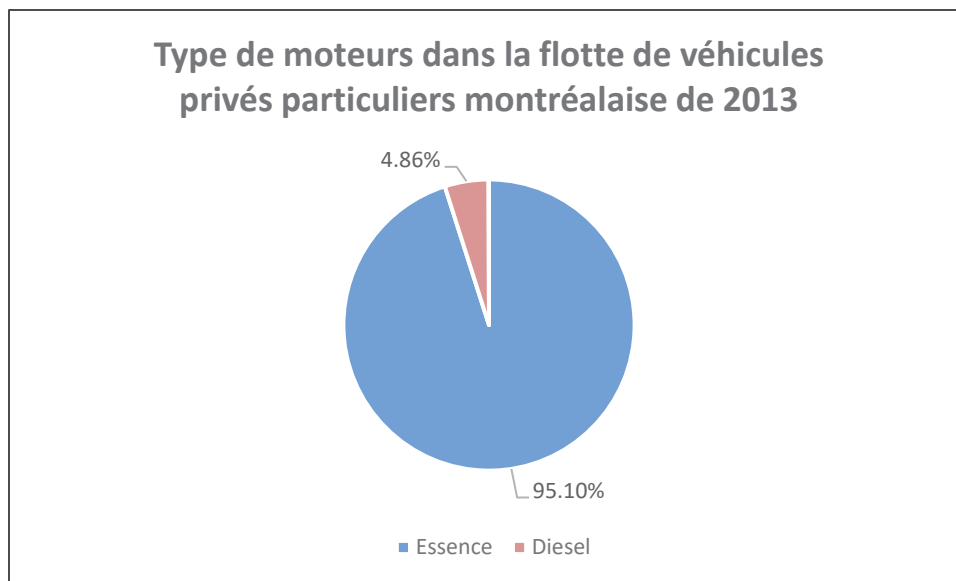


Figure 3.2 Type de moteurs au sein de la flotte de véhicules privés
montréalaise en 2013

L'exécution de la simulation AIMSUN a permis d'obtenir les résultats de référence suivants :

Tableau 3.1 Résultats de référence pour la simulation AIMSUN

Nombre d'automobiles dans la simulation	84 231
Distance parcourue en automobile	300 988 km
Distance moyenne parcourue par les automobiles sur la simulation	3,57 km

Le modèle d'émissions MOVES permet ensuite de calculer que le total d'émissions de gaz à effet de serre émis durant la simulation est de 71,6 t de CO₂. Ci-dessous, les résultats d'émissions pour chaque section de route du modèle :



Figure 3.3 Carte des émissions de GES du transport routier à haute résolution spatiale pour l'arrondissement de Saint-Laurent de 7 h à 8 h lors d'une journée de semaine d'automne

Il peut être constaté que certaines sections du réseau routier apparaissent grisées dans les résultats de la simulation, ce qui indique l'absence de données d'émissions pour ces segments. Ce phénomène s'explique par le fait qu'aucun véhicule ne les a parcourues au cours de la simulation effectuée sur une heure dans AIMSUN. Cette absence de circulation ne reflète pas nécessairement la réalité, mais révèle plutôt une limitation méthodologique liée à la nature des données utilisées et au fonctionnement du modèle de trafic.

D'une part, la demande en transport modélisée repose sur des données issues de l'Enquête Origine-Destination, qui sont échantillonnées. Cela signifie qu'une portion seulement des déplacements réels de la population est représentée, et certains trajets localisés ou moins fréquents peuvent ne pas être captés. Par conséquent, des sections de voirie secondaires ou très locales peuvent être sous-représentées, voire totalement absentes de la simulation.

D'autre part, la manière dont AIMSUN effectue l'affectation des trajets sur le réseau peut également contribuer à ce phénomène. L'algorithme d'affectation cherche à optimiser les trajets, ce qui peut conduire à négliger certaines portions du réseau, en particulier si elles sont peu stratégiques ou redondantes avec d'autres routes plus directes. Ainsi, même si une section est techniquement accessible, elle peut être écartée dans la modélisation du trafic si aucun trajet simulé ne la privilégie.

3.2 Scénarios électrification

Dans les trois scénarios d'électrification, la part de véhicules électriques, diesel et essence est modifiée. Les nouvelles parts sont détaillées en figure 3.4 ci-dessous. Bien que les véhicules à essence demeurent majoritaires, les trois scénarios de Dunsky projettent une progression significative du nombre de véhicules électriques dans la flotte, atteignant jusqu'à 12 % dans le scénario le plus ambitieux.

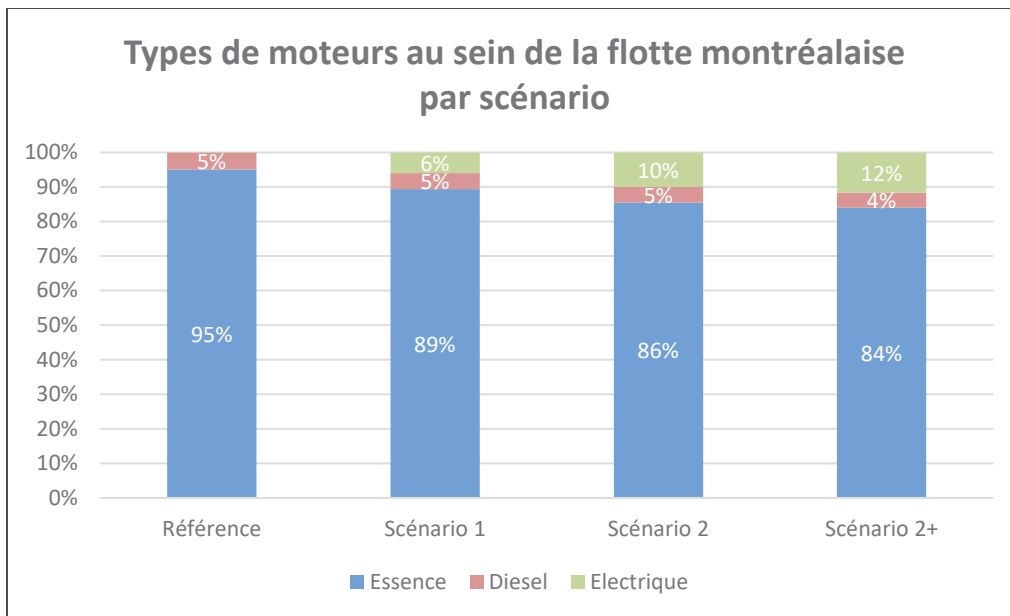


Figure 3.4 Types de moteurs au sein de la flotte de véhicules privés
montréalaise par scénario d'électrification

Après simulation dans MOVES, les émissions de CO₂ ont été estimées à 67 t, 64 t et 63 t pour les scénarios S1, S2 et S2+, correspondant à une réduction respective de 7 %, 11 % et 13 % par rapport au trafic de référence (*Voir figure 3.5, p.92*). Ces résultats sont cohérents puisque la quantité d'émissions diminue proportionnellement à la réduction du nombre de véhicules à essence dans la flotte.

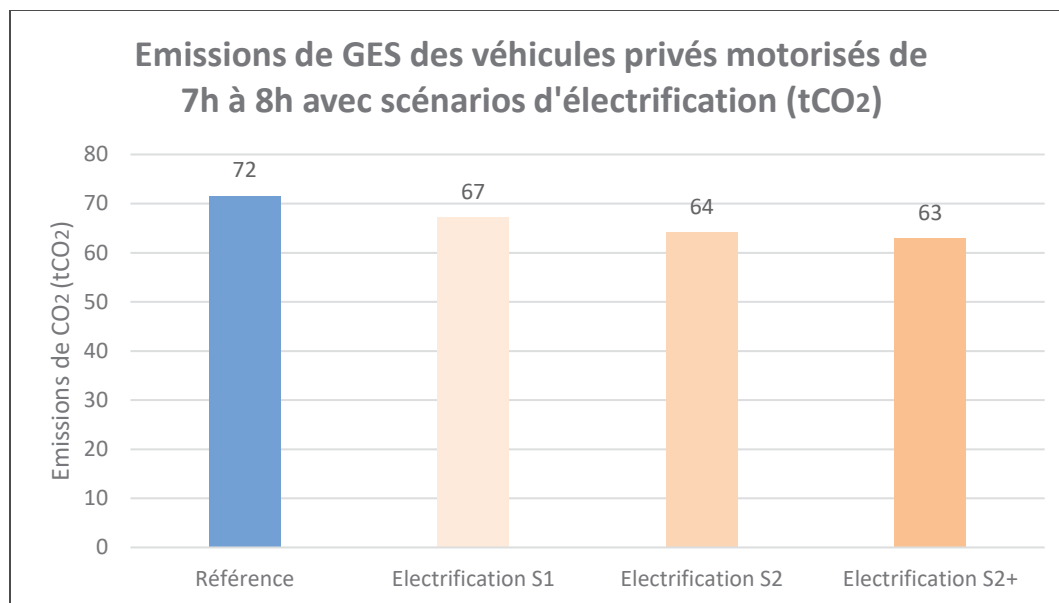


Figure 3.5 Émissions de GES de la flotte de véhicules privés montréalaise par scénario

3.3 Scénario E15

Dans ce scénario, seule la composition du carburant essence a été modifiée : le taux d'éthanol a été passé de 10 à 15 %. Le total des émissions de GES est 71,5 t CO₂.

L'évolution de la part des émissions pour chaque carburant est la suivante :

Tableau 3.2 Part des émissions par carburant pour le scénario « E15 »

Scénario	Essence	Diesel
Référence	68 007 KgCO ₂ – 95,00 %	3 581 KgCO ₂ – 5,00 %
E15	67 939 KgCO ₂ – 94,99 %	3 581 KgCO ₂ – 5,01 %

L'impact de ce scénario est très faible sur la diminution des émissions de GES. La part des émissions par carburant reste relativement inchangée.

3.4 Scénario modes actifs

L'étape préliminaire à la modélisation du scénario « Modes actifs » était la détermination de distances seuil pour la marche et l'usage du vélo par tranches d'âge et de genre à partir des données observées dans l'Enquête OD 2013.

Les figures ci-dessous présentent ces distances seuil pour chaque genre en fonction de la tranche d'âge. Les valeurs précises des distances seuil sont disponibles en Annexe V.

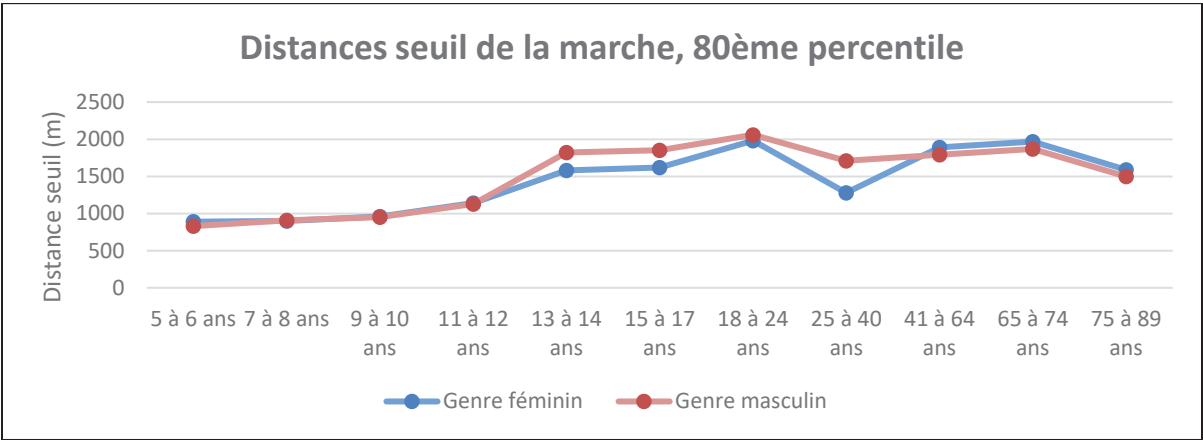


Figure 3.6 Distances seuil de la marche, 80^{ème} percentile
Calculées à partir de l'Enquête OD 2013

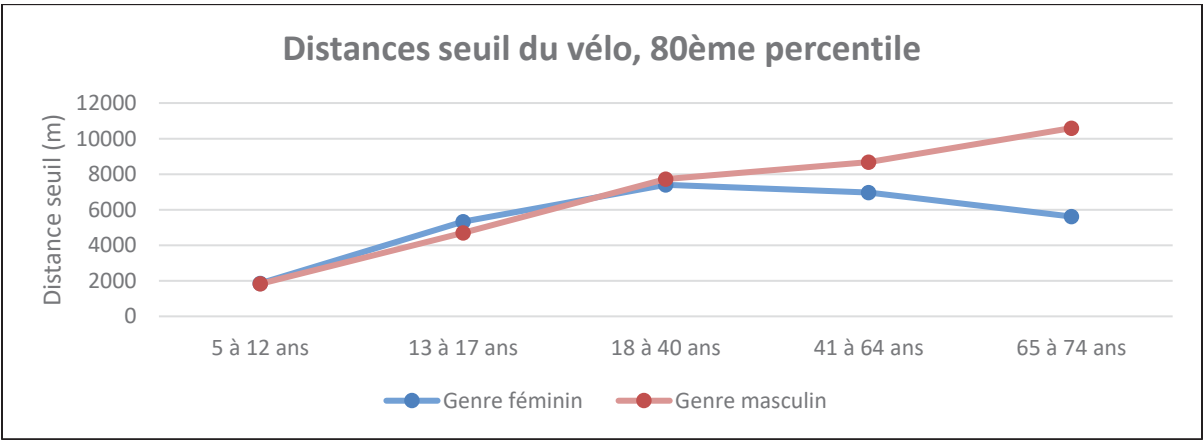


Figure 3.7 Distances seuil du vélo, 80^{ème} percentile
Calculées à partir de l'Enquête OD 2013

Ces distances sont calculées à partir de l'ensemble des données de l'enquête OD 2013 tout territoire confondu et pour toute la journée.

Les données de l'Enquête OD ont ensuite été traitées conformément à la méthode détaillée en section 2.5.3. Les critères de transfert aux modes actifs ont été appliqués, permettant d'obtenir les résultats ci-dessous pour les scénarios A, B, C et D. Pour rappel, le scénario A repose sur un transfert modal basé uniquement sur les distances seuils des conducteurs, tandis que les scénarios B, C et D intègrent également celles des passagers. Les scénarios C et D tiennent compte de la structure de la chaîne de déplacements. Enfin, le scénario D prend en considération le motif des déplacements effectués à vélo. Les critères de transfert modal les plus réalistes sont les B et C.

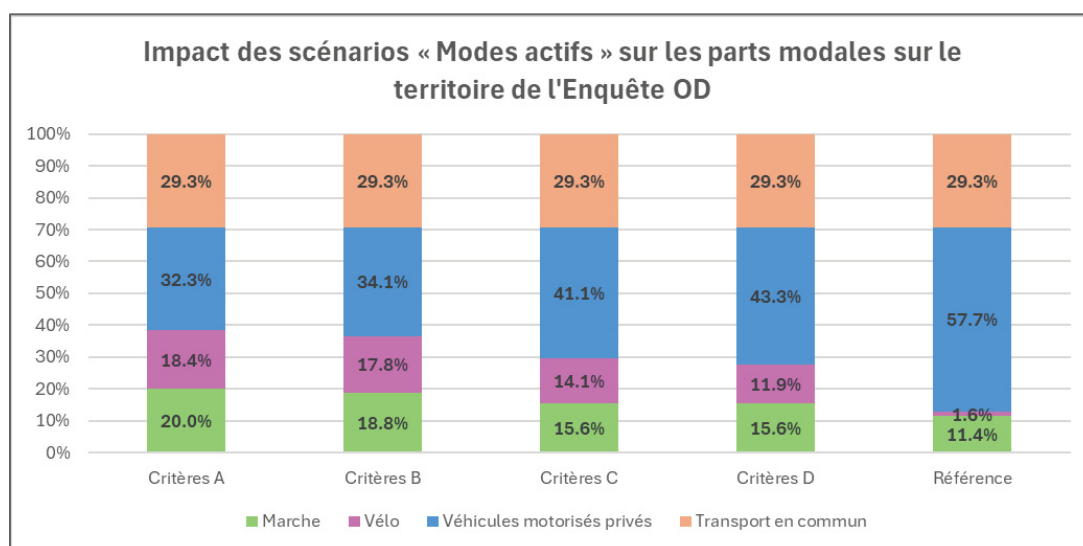


Figure 3.8 Impact des scénarios « Modes actifs » sur les parts modales de la circulation à l'heure de pointe sur tout le territoire de l'enquête OD

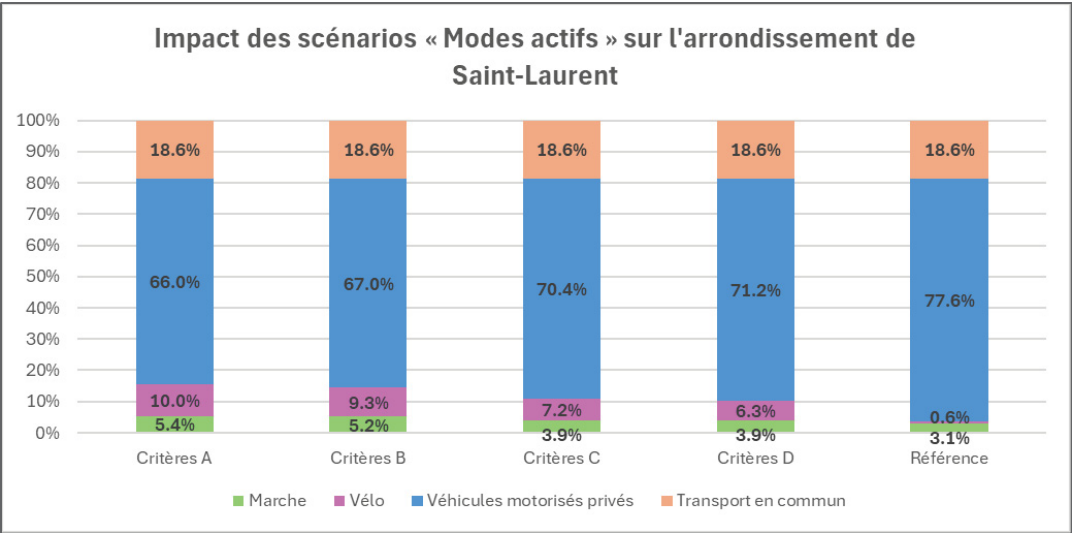


Figure 3.9 Impact des scénarios « Modes actifs » sur les parts modales de la circulation à l’heure de pointe sur l’arrondissement de Saint-Laurent

Sur le périmètre de l’Enquête OD, les parts modales maximums de la marche et du vélo seraient de 20,0 et 18,4 % respectivement (*Voir* figure 3.8, p.94). Sur l’arrondissement de Saint-Laurent, le potentiel de ces modes de transport est plus faible avec des parts modales maximums respectives de 10,0 et 5,4 % (*Voir* figure 3.9).

Tableau 3.3 Part des trajets transférables aux modes actifs sur tout le territoire de l’enquête OD

	Critères A	Critères B	Critères C	Critères D
Marche	9%	7%	4%	4%
Vélo	17%	16%	12%	10%
Total	25%	24%	17%	14%

Tableau 3.4 Part des trajets transférables aux modes actifs sur l'arrondissement de Saint-Laurent

	Critères A	Critères B	Critères C	Critères D
<i>Marche</i>	2%	2%	1%	1%
<i>Vélo</i>	9%	9%	7%	6%
<i>Total</i>	12%	11%	7%	7%

Le potentiel de transfert modal est globalement plus faible sur le périmètre de l'arrondissement que sur le territoire de l'Enquête OD au complet (*Voir* tableau 3.3, p.95 et tableau 3.4, p.96). Cela s'explique principalement par le fait que les trajets effectués au sein de l'arrondissement sont en moyenne de plus longues distances que ceux effectués dans le reste de la ville. Le potentiel de transfert modal au vélo est plus important que celui de la marche dans les deux cas, ce qui montre qu'il y a une part assez importante des trajets dont la distance est comprise entre les distances seuil de la marche et celles du vélo.

Les résultats précédents permettent de modifier la matrice OD de référence, qui est ensuite importée dans le modèle AIMSUN. Les résultats des simulations de circulation des quatre scénarios sont exposés ci-dessous.

Tableau 3.5 Résultats des simulations de circulation AIMSUN pour les scénarios « Modes Actifs »

	Référence	Critères A	Critères B	Critères C	Critères D
<i>Nombre d'automobiles dans la simulation</i>	84 231	74 123	74 685	76 091	76 447
<i>Distance parcourue en automobile</i>	300 988 km	279 053 km	279 822 km	283 056 km	283 874 km
<i>Distance moyenne parcourue par les automobiles</i>	3,57 km	3,76 km	3,75 km	3,72 km	3,71 km

Après application des scénarios, une baisse du nombre d'automobiles au sein de la simulation est bien constatée, allant jusqu'à plus de 10 000 véhicules en moins pour le scénario A. Cela engendre une diminution de la distance parcourue en automobile durant l'heure de pointe et une augmentation de la distance moyenne parcourue par les véhicules puisque ce sont les trajets les plus courts qui ont été transférés aux modes actifs.

La simulation MOVES permet d'obtenir les quantités d'émissions de GES suivantes pour chaque scénario :

Tableau 3.6 Résultats des simulations MOVES pour les scénarios « Modes Actifs »

	Référence	Critères A	Critères B	Critères C	Critères D
<i>Émissions de GES (tCO₂)</i>	71,6	65,1	65,4	66,3	66,5

Une diminution de 9% des émissions de GES en heure de pointe peut être espérée au maximum pour ce scénario.

3.5 Scénario covoiturage

Le second scénario nécessitant une nouvelle modélisation de la circulation est le scénario « Encouragement à l'usage du covoiturage ». Pour rappel, le remplissage des véhicules de la simulation est optimisé de sorte à augmenter leur taux d'occupation et diminuer le nombre de voitures sur la route.

Après application des critères de suppression des trajets auto-conducteurs inutiles, les nouvelles parts modales des transports ont pu être évaluées :

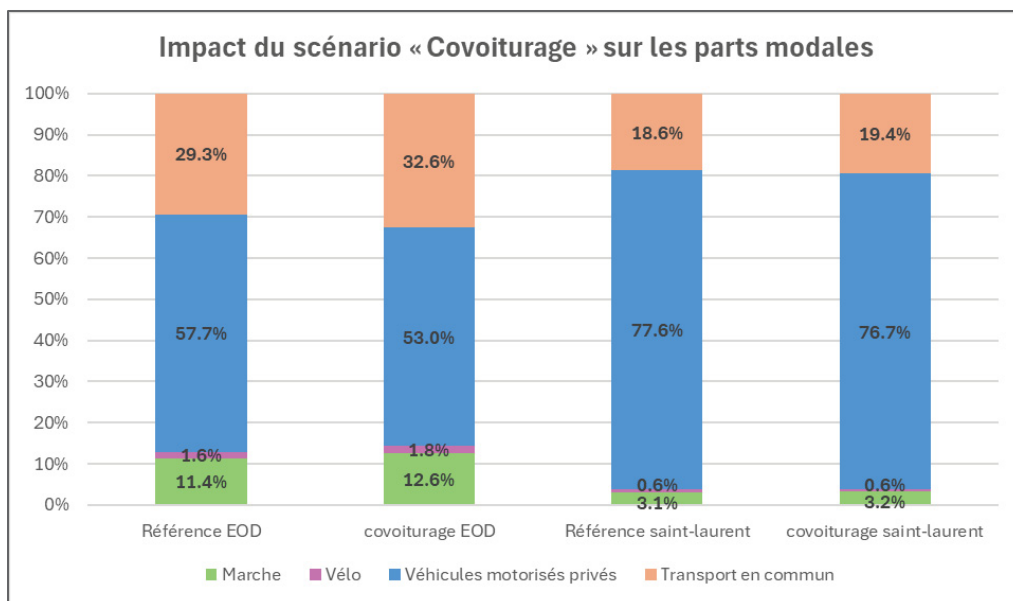


Figure 3.10 Impact des scénarios « Covoiturage » sur les parts modales
de la circulation à l'heure de pointe

Le scénario « Covoiturage » a un impact très faible sur les parts modales. En effet, bien que le scénario diminue le nombre de trajets effectués en voiture, il n'implique pas un transfert modal vers un autre mode, ce qui explique son influence relativement faible sur la répartition modale.

La part des trajets éliminés en automobiles après transfert des passagers est de 10 % sur le territoire de l'Enquête OD et de 4 % sur l'arrondissement de Saint-Laurent. Là encore, le potentiel du scénario est plus faible sur le périmètre restreint de la simulation. Les taux d'occupation moyens des véhicules individuels privés passent de 1,32 à 1,58 sur le territoire entier de l'enquête OD et de 1,20 à 1,26 sur l'arrondissement de Saint-Laurent. Une augmentation du nombre de passagers par véhicule est donc bien constatée.

Tableau 3.7 Résultats des simulations de circulation AIMSUN pour les scénarios
« Covoiturage »

	Référence	Covoiturage
<i>Nombre d'automobile dans la simulation</i>	84 231	77 253
<i>Distance parcourue en automobile</i>	300 988 km	282 128 km
<i>Distance moyenne parcourue par les automobiles sur un déplacement</i>	3,57 km	3,65 km

L'application de ce scénario permet de diminuer de presque 7 000 véhicules la simulation (*Voir* tableau 3.7). La diminution du nombre de véhicules est moins marquée que dans les scénarios « Modes actifs ». Toutefois, la réduction de la distance parcourue en automobile reste significative, car ce scénario tend à éliminer des trajets plus longs.

La simulation MOVES permet d'estimer la quantité d'émissions de CO₂ à 66,4 t CO₂ pour ce scénario, soit une diminution de 7,29% par rapport au trafic de référence.

3.6 Combinaison et comparaison de scénarios

Il est intéressant d'estimer quel serait le potentiel maximal de réduction des émissions en combinant différents des scénarios présentés précédemment entre eux. Ainsi, les scénarios « Covoiturage » et « Modes actifs » ont été combinés. Seuls les critères B et C du scénario « Modes actifs » ont été considérés ici car il s'agit des critères de transfert modal les plus réalistes parmi les quatre versions proposées. Deux nouvelles modélisations de circulation ont donc été réalisées pour calculer l'impact de ces scénarios. Pour rappel, les trajets ont d'abord été transférés vers les modes actifs lorsque cela était possible. Les trajets pouvant être réalisés en covoiturage ont ensuite été identifiés parmi les trajets restants.

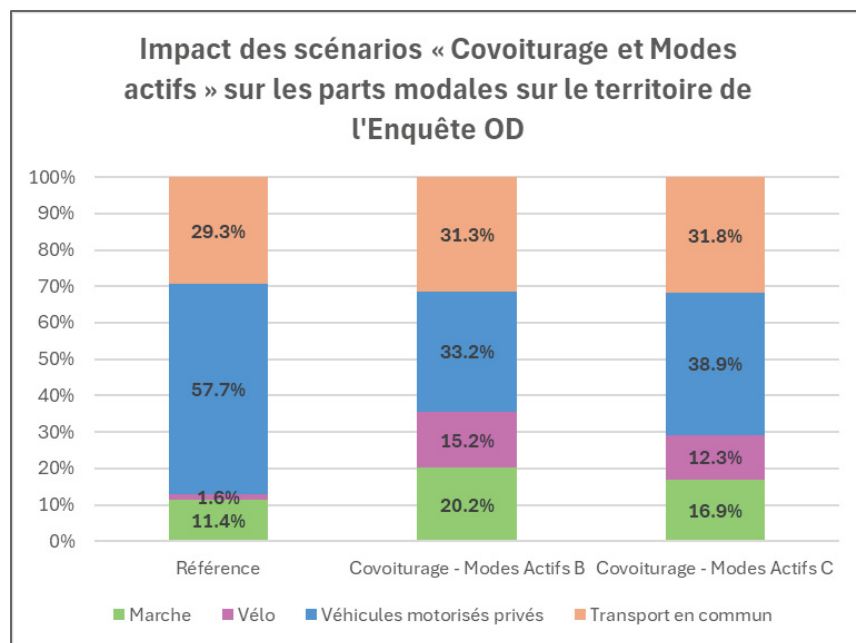


Figure 3.11 Impact des scénarios « Covoiturage et Modes actifs »
sur les parts modales de la circulation à l'heure de pointe pour l'ensemble
du territoire de l'Enquête OD

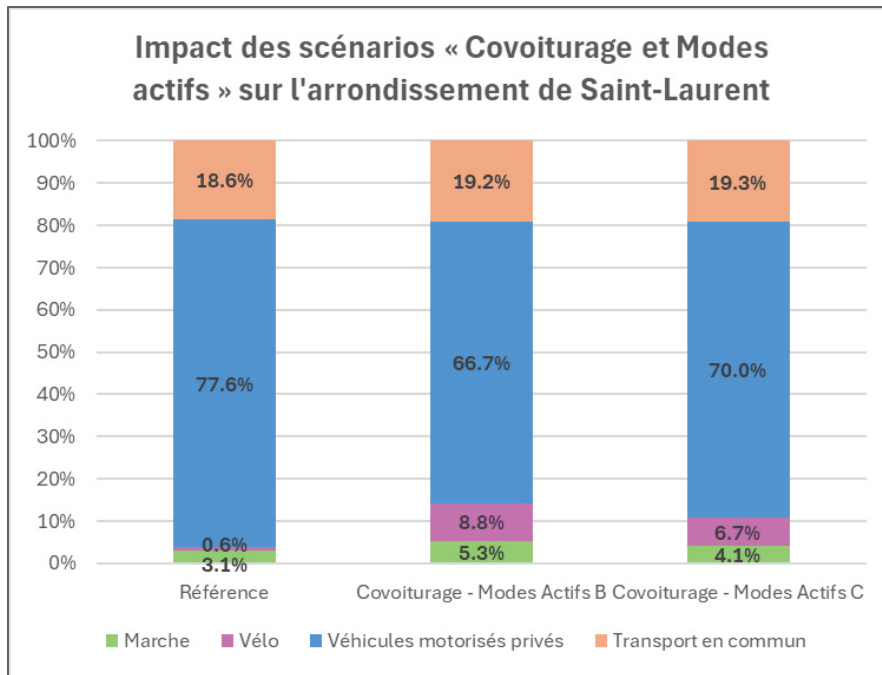


Figure 3.12 Impact des scénarios « Covoiturage et Modes actifs »
sur les parts modales de la circulation à l'heure de pointe
sur l'arrondissement de Saint-Laurent

Les deux combinaisons de scénarios ont un fort potentiel de changement des parts modales au profit des modes actifs sur le territoire de l'Enquête OD (*Voir* figure 3.11, p.100). Ce potentiel est plus faible sur le périmètre de l'arrondissement, avec des parts modales maximums de 8,8% pour la marche et 5,3% pour le vélo (*Voir* figure 3.12).

Tableau 3.8 Résultats des taux d'occupation des automobiles pour les scénarios «
Covoiturage et Modes actifs »

	Référence	Covoiturage	Covoiturage et Modes actifs B	Covoiturage et Modes actifs C
<i>Taux d'occupation automobile – Territoire de l'enquête OD</i>	1,32	1,58	1,52	1,55
<i>Taux d'occupation automobile – arrondissement de Saint- Laurent</i>	1,20	1,26	1,25	1,26

Bien que les taux d'occupation atteints grâce à ces scénarios soient un peu plus faibles que ceux du scénario covoiturage, une bonne progression du nombre de passagers par véhicule est constatée (*Voir* tableau 3.8).

Tableau 3.9 Résultats des simulations de circulation AIMSUN pour les scénarios «
Covoiturage et Modes actifs »

	Référence	Covoiturage et Modes actifs B	Covoiturage et Modes actifs C
<i>Nombre d'automobile dans la simulation</i>	84 231	69 677	72 610
<i>Distance parcourue en automobile</i>	300 988 km	274 259 km	276 941 km
<i>Distance moyenne parcourue par les automobiles sur un déplacement</i>	3,57 km	3,94 km	3,81 km

La combinaison de ces scénarios a permis de réduire de plus de 10 000 le nombre de véhicules dans la simulation, entraînant une diminution de plus de 24 000 km de distance parcourue en

automobile (*Voir* tableau 3.9, p.102). Après calcul dans MOVES, cette réduction se traduit par des émissions de GES estimées à 64,58 tCO₂ pour le scénario « Covoiturage et Modes actifs B » et à 65,43 tCO₂ pour « Covoiturage et Modes actifs C ».

Les scénarios « Covoiturage », « Modes actifs » et leurs combinaisons ont ensuite été couplés aux scénarios d’électrification et d’usage du carburant E15. Pour rappel, ces scénarios n’affectent pas la modélisation de la circulation et n’ont donc d’impact ni sur les parts modales ni sur les taux d’occupation des véhicules.

La modélisation de tous ces scénarios et leurs combinaisons sur le logiciel MOVES permet ainsi de comparer leur impact sur les émissions de GES.

Ci-dessous en figure 3.13, les différentes quantités d’émissions de GES émises durant la simulation sont présentées pour les principaux scénarios étudiés dans ce mémoire.

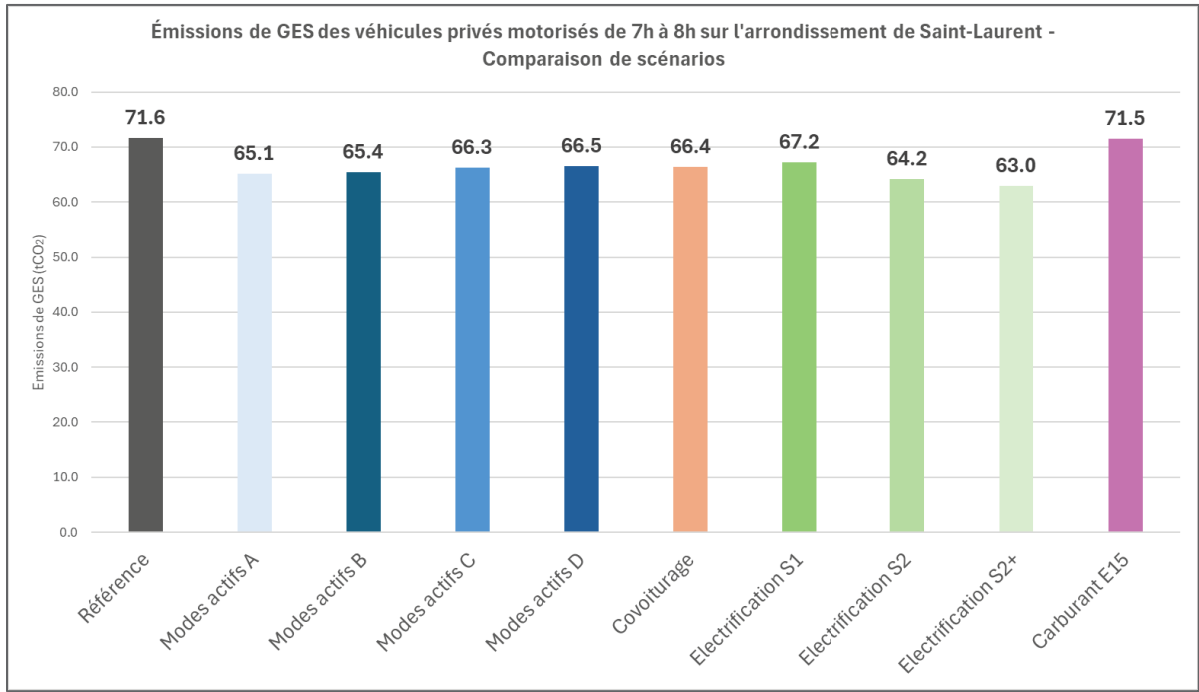


Figure 3.13 Impact des principaux scénarios étudiés sur les émissions de GES des véhicules privés motorisés de 7 h à 8 h dans l’arrondissement de Saint-Laurent

Le scénario ayant l'impact le plus élevé est le scénario d'électrification accéléré S2+, qui correspond à une diminution de 12% des émissions. Celui influençant le moins les résultats est le scénario d'usage du carburant E15, qui ne réduit que de 0,1 tCO₂ les émissions.

L'impact des différentes combinaisons de scénario a ensuite été comparé (*Voir* figure 3.14).

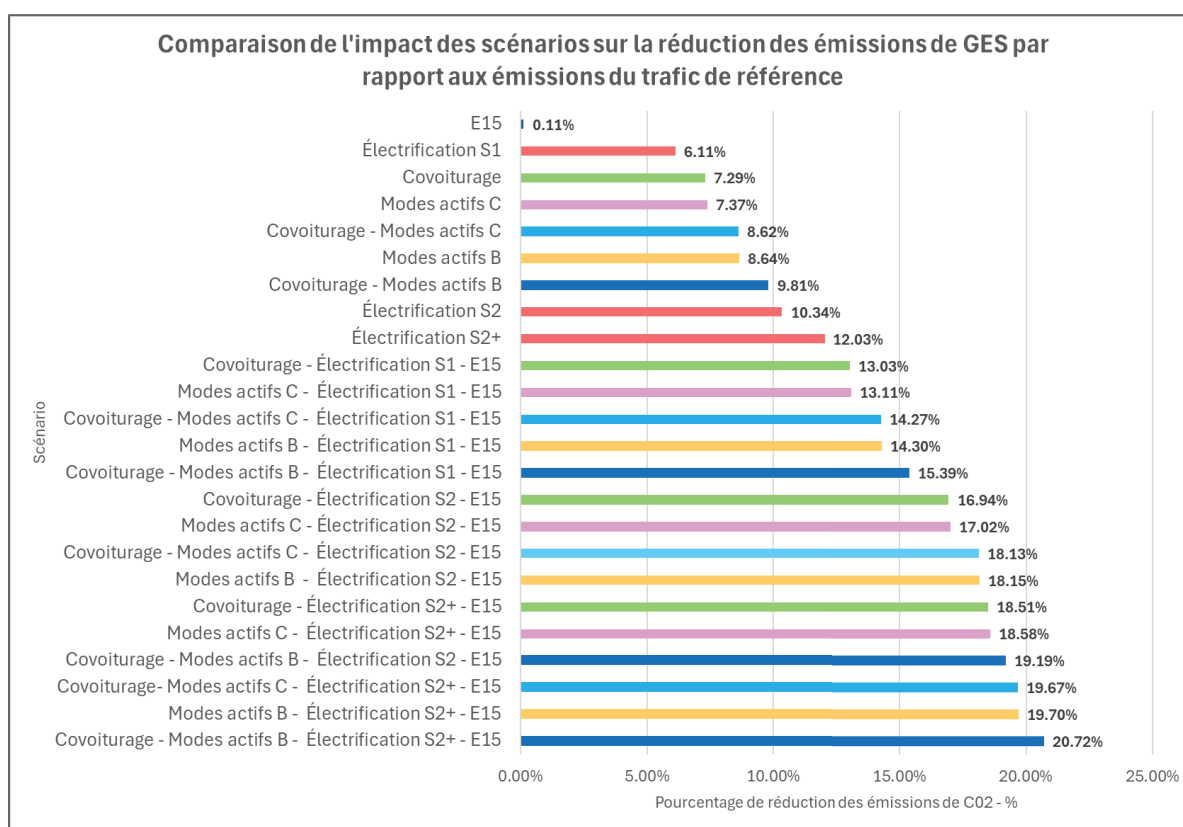


Figure 3.14 Comparaison de l'impact des scénarios sur la réduction des émissions de GES par rapport aux émissions du trafic de référence à l'heure de pointe sur l'arrondissement de Saint-Laurent

L'association de tous les scénarios permet d'atteindre des potentiels de réduction maximaux de l'ordre de 20 %, ce qui est prometteur et démontre l'intérêt de ne pas se limiter à une seule mesure de mobilité. Néanmoins, ces résultats correspondent à des potentiels théoriques maximums et sont donc difficilement atteignables en pratique. Il doit également être souligné qu'aucun des trois scénarios principaux seul - augmentation du covoiturage et de l'usage des

modes actifs, électrification accrue ou nouvelle composition de carburant - ne semble suffisant pour impacter significativement les émissions de GES. C'est en combinant plusieurs leviers d'actions que des résultats intéressants pourront être obtenus, ce qui met en lumière la nécessité de développer des méthodes de modélisation permettant de simuler les interactions entre différentes mesures de mobilité.

3.7 Visualisation des résultats sur la Carte Carbone

Le logiciel MOVES permet de calculer, pour chaque simulation, les taux d'émissions en fonction des types de routes et des vitesses moyennes observées sur chaque section. Ces résultats ont été utilisés pour estimer les émissions de GES entre 7 h et 8 h sur l'ensemble des sections routières de l'arrondissement de Saint-Laurent.

Afin de mettre en lumière l'impact des scénarios à haute résolution spatiale, il est possible de réaliser des cartes représentant la différence d'émissions entre la circulation de référence et le scénario à l'étude. Les figures 3.15 et 3.16 illustrent ces résultats à l'aide d'une échelle de couleur allant du rouge au vert foncé. Plus une section tend vers le rouge, plus le scénario y a entraîné une hausse des émissions de GES. À l'inverse, une teinte verte indique une diminution des émissions sur la section concernée.

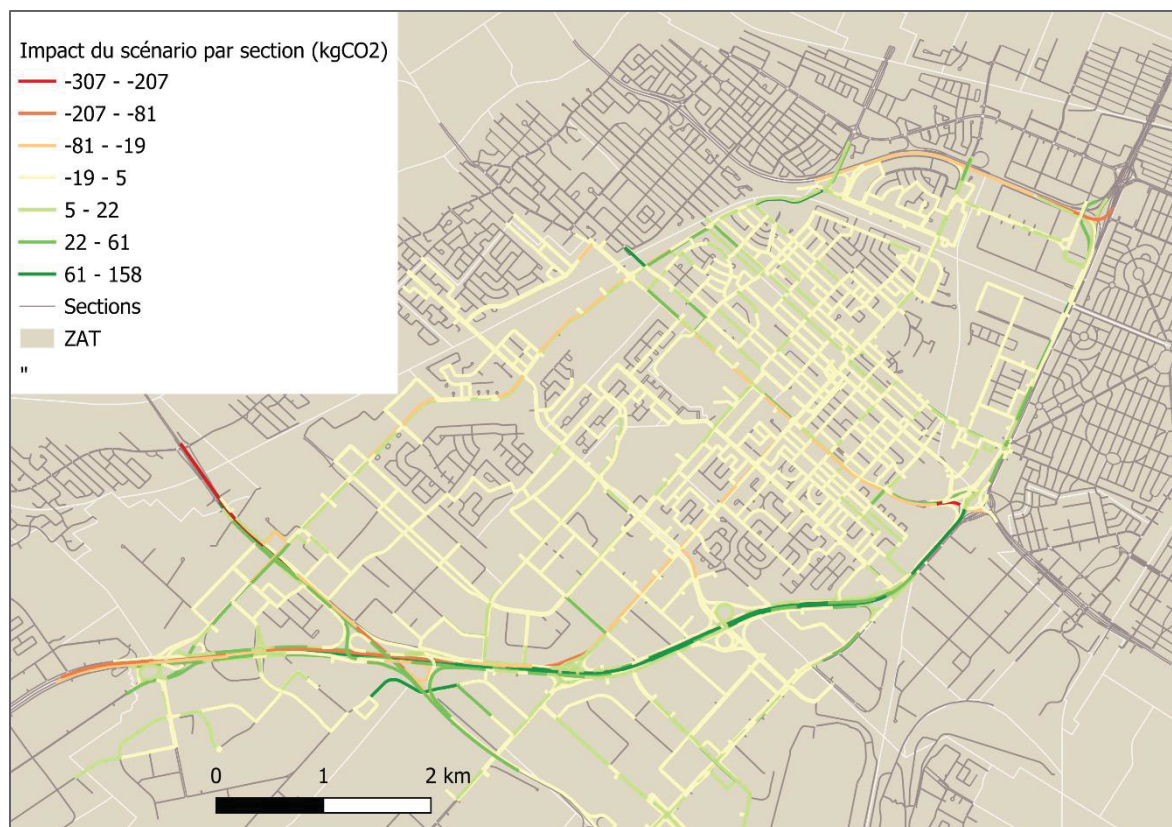


Figure 3.15 Carte des différences des émissions de GES du transport routier entre le trafic de référence et le trafic avec scénario « Covoiturage » pour l'arrondissement de Saint-Laurent de 7 h à 8 h lors d'une journée de semaine d'automne

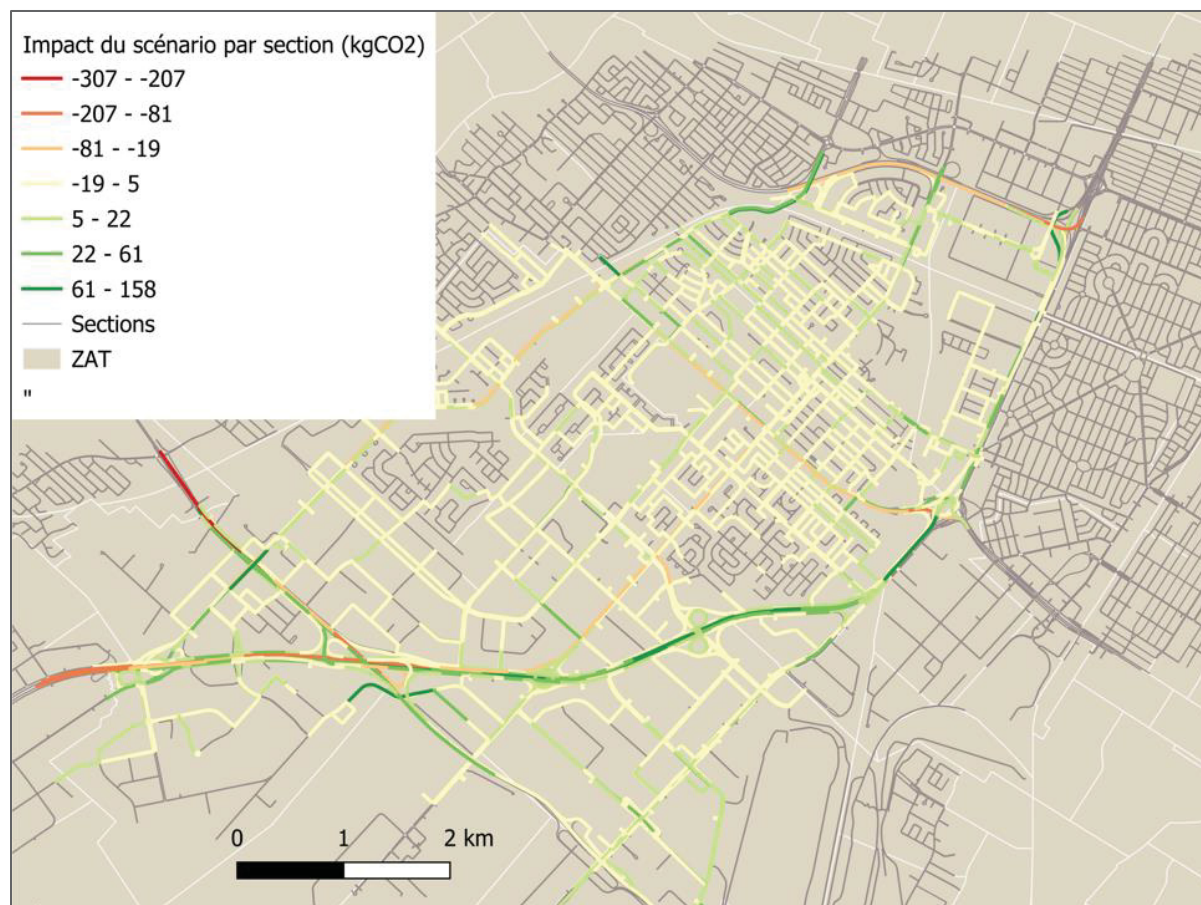


Figure 3.16 Carte des différences des émissions de GES du transport routier entre le trafic de référence et le trafic avec scénario « Modes actifs A » pour l'arrondissement de Saint-Laurent de 7 h à 8 h lors d'une journée de semaine d'automne

Les cartes ci-dessus montrent qu'un scénario peut, malgré une baisse globale des émissions de GES, avoir des effets négatifs localisés, notamment en générant de nouvelles zones de congestion sur certaines sections. Ce type de résultat souligne l'importance de s'appuyer sur des résultats à haute résolution spatiale pour orienter les décisions en matière de mobilité, afin d'anticiper les impacts indésirables de certains projets.

Il peut également être constaté que la différence entre les deux scénarios ci-dessus n'est pas immédiatement évidente visuellement. Dans le cadre du développement d'un outil de

sensibilisation, il sera donc important de faciliter l'interprétation de ce type de résultats et la comparaison entre scénarios.

CHAPITRE 4

DISCUSSION

L'objectif principal de ce mémoire était de développer un cadre méthodologique pour modéliser et visualiser les émissions de GES associées à différents scénarios de mobilité, dans le but de les intégrer à l'outil numérique de la Carte Carbone de Montréal.

Dans un premier temps, un état des lieux des scénarios de mobilité visant à réduire les émissions de GES en milieu urbain a été réalisé, ainsi qu'une revue des travaux de modélisation existants, afin d'identifier les approches méthodologiques les plus courantes.

Ensuite, des méthodes ont été élaborées pour modéliser plusieurs scénarios à partir des données et des modèles actuellement disponibles. Quatre scénarios ont été retenus : l'encouragement aux modes actifs, la promotion du covoiturage, l'électrification de la flotte de véhicules et une modification de la composition des carburants.

Enfin, l'étude s'est concentrée sur l'optimisation du processus de modélisation, notamment par l'automatisation de certaines étapes dans le couplage entre les modèles de trafic et d'émissions. L'objectif était de faciliter la reproductibilité et l'adaptation de la méthodologie à d'autres scénarios futurs.

Ce chapitre dresse un bilan des résultats obtenus, discute leurs limites, et propose des recommandations pour le développement de la Carte Carbone ainsi que pour la modélisation de scénarios de mobilité en général.

4.1 Bilan des résultats et interprétations

Les quatre méthodes développées dans ce mémoire ont permis d'obtenir des premières estimations de potentiels de réduction d'émissions de GES des transports dans l'arrondissement de Saint-Laurent.

Concernant les scénarios ayant un impact sur la demande en transport, les méthodes développées pour les scénarios « Modes Actifs » et « Covoiturage » n'ont pas pour intention de tester l'impact d'une mesure particulière, mais d'estimer le potentiel maximum de réduction d'émissions de GES qui pourrait être théoriquement atteint si ces pratiques étaient plus encouragées au sein de la population. Il est donc nécessaire de réfléchir à quelles actions permettraient de se rapprocher au mieux des réductions d'émissions estimées dans l'arrondissement de Saint-Laurent.

En particulier pour les scénarios « Modes Actifs », il est important de noter que contrairement aux scénarios « Électrification », les quatre scénarios proposés ne correspondent pas à des paliers progressifs de réduction d'émissions. Ils visent plutôt à tester différents critères afin d'affiner les résultats. Bien que certains critères puissent s'avérer trop restrictifs, cette approche permet d'obtenir une première évaluation de l'incertitude associée à ces derniers.

Le scénario « Mode actif A » fournit une estimation relativement large, puisqu'il ne prend en compte que la distance seuil du conducteur. Les autres scénarios considèrent également la distance seuil des passagers, ce qui correspond à une hypothèse plus réaliste. Les scénarios C et D tiennent compte de la structure de la chaîne de déplacement, un facteur important dans le choix modal. Toutefois, ce critère peut être jugé trop restrictif : au sein d'une même chaîne incluant l'automobile, il est possible d'utiliser plusieurs modes de transport différents. Enfin, le scénario D considère que les trajets ayant pour motif « faire des courses » ou « accompagner quelqu'un » ne peuvent être réalisés en vélo. Dans les faits, ce critère devrait perdre en pertinence avec la démocratisation du vélo, notamment grâce à l'essor du vélo cargo et des services de vélo-partage.

Les scénarios de modification de la composition des carburants sont finalement les moins intéressants, puisque les carburants essence contiennent actuellement déjà 10 % d'éthanol au Québec (Gouvernement du Québec, 2023b). Ils ne devraient pas dépasser 15 % à l'avenir, conformément aux recommandations réglementaires, puisqu'un taux plus élevé a tendance à

altérer les performances des moteurs. Ce type de mesure n'est donc pas un levier d'atténuation des émissions important.

Les trois autres scénarios permettent d'obtenir des réductions des émissions à l'heure de pointe intéressantes, notamment lorsqu'ils sont combinés, atteignant un potentiel maximal de réduction des émissions de 20,72%.

La contribution majeure de ce mémoire ne réside pas dans les résultats d'émissions en tant que tels. En effet, les données utilisées datent déjà de plus de dix ans et ne permettent donc pas de tirer de conclusions sur les bénéfices possibles de réduction des émissions dans l'arrondissement de Saint-Laurent actuellement. Néanmoins, les méthodes utilisées ont été développées de telles sorte à pouvoir être appliquées sans problèmes à des données plus récentes, tant que celles-ci respectent la même structure. La donnée d'entrée essentielle est une enquête de mobilité de la population semblable à l'enquête Origine-Destination.

De plus, la première méthode envisagée dans ce mémoire, pour les scénarios encouragement au covoiturage et aux modes actifs, repose sur l'existence de matrices Origine-Destination déjà ajustées par la Ville de Montréal au modèle de circulation AIMSUN. De la même façon, pour répliquer ces travaux à d'autres arrondissements ou d'autres villes, il faudrait disposer de données d'entrée similaires. Néanmoins, des résultats plus agrégés pourraient être calculés sans utiliser de modèle de circulation.

Ce mémoire a ainsi permis de dresser un premier portrait des différentes méthodes de modélisation de scénarios de mobilité et de développer plus spécifiquement quatre premiers scénarios, du traitement des données de l'enquête Origine-Destination jusqu'à la visualisation à haute résolution spatiale sur la carte de l'arrondissement. Les méthodes développées pourront être directement reprises et adaptées pour intégrer ces scénarios et en développer de nouveaux sur la Carte Carbone lorsque l'outil sera opérationnel.

4.2 Limites des résultats

Les résultats présentés dans ce mémoire doivent être interprétés avec précaution et ne peuvent, à ce stade, être utilisés pour éclairer les décisions municipales en matière de politiques de mobilité durable. En effet, comme souligné précédemment, les données de mobilité et le réseau routier utilisés datent de 2013, ce qui pourrait conduire à une surestimation ou une sous-estimation des potentiels de réduction des émissions. Depuis cette date, l'arrondissement a déjà mis en place diverses mesures de mobilité, contribuant ainsi à une diminution des émissions de GES.

Néanmoins, bien que les résultats ne puissent être pris tels quels, la comparaison des scénarios entre eux reste cohérente, puisqu'ils ont tous été modélisés à partir des mêmes données et sur la même base méthodologique.

Par ailleurs, pour qu'une estimation de l'impact des futurs scénarios soit réellement pertinente, il serait nécessaire d'intégrer un maximum d'éléments représentatifs de la situation future, tels que l'évolution démographique, les activités des habitants, ou encore le nombre de véhicules par ménage. Actuellement, les scénarios sont modélisés sur la base de la situation en 2013, comme si toutes les mesures étaient mises en place instantanément cette même année. Or, dans la réalité, ces mesures seront déployées progressivement dans le temps, et il pourrait être intéressant d'analyser les différences d'impact en fonction du moment de leur mise en œuvre.

Bien que les facteurs de prévision de l'Enquête OD 2013 jusqu'en 2031 soient disponibles, la méthode développée dans ce mémoire ne permet pas de reconstruire une nouvelle matrice OD à partir des données repondérées de l'enquête. Une telle approche nécessiterait en effet de repartir de zéro pour la construction de la matrice et exigerait un travail de calibration pour adapter la matrice au modèle AIMSUN, du fait de la difficulté à identifier les centroïdes des déplacements entrants et sortants de l'arrondissement. Étant donné que le MTMD élabore actuellement des matrices en s'appuyant sur ces facteurs de prévision, il serait plus pertinent

de tirer parti de leur travail, en collaboration avec le SUM, afin d'accéder directement aux matrices correspondantes.

Dans le cas de cette étude, l'hypothèse est faite que la demande en transport reste constante dans tous les scénarios. En réalité, tous ces scénarios peuvent potentiellement avoir un impact sur celle-ci. Par exemple, il est possible que l'augmentation du nombre d'individus utilisant les modes actifs rende paradoxalement l'usage de la voiture plus attractif, car cela entraînerait moins de congestion.

La combinaison des différents scénarios permet uniquement d'estimer un potentiel maximal de réduction des émissions, car les scénarios « covoiturage » et « potentiel modes actifs » reposent eux-mêmes sur des calculs de potentiel théorique. Ces estimations ne tiennent donc pas compte des contraintes réelles qui pourraient limiter leur mise en œuvre effective. De plus, comme mentionné précédemment, des effets rebond difficiles à anticiper peuvent survenir, réduisant ainsi les bénéfices environnementaux escomptés. Par exemple, un encouragement à la pratique du covoiturage pourrait mener des usagers des modes actifs à utiliser l'automobile, compensant en partie les gains obtenus. Ces incertitudes soulignent la nécessité d'une approche prudente dans l'interprétation des résultats.

4.3 Recommandation pour les futures études et la carte carbone

Les limites exposées précédemment ont permis de mettre en lumière plusieurs axes d'amélioration dans l'étude de la modélisation des scénarios de mobilité. De plus, des réflexions concernant l'outil particulier de la Carte Carbone et son interface sont exposées à la fin du chapitre.

4.3.1 Amélioration de la modélisation des scénarios

Plusieurs méthodes de modélisation de scénarios de mobilité ont été présentées dans ce mémoire. Ci-dessous, plusieurs pistes d'amélioration sont mentionnées afin d'affiner les résultats ou d'enrichir les scénarios proposés.

4.3.1.1 Modélisation de mesures de mobilité impactant la demande en transport

Comme rappelé précédemment, les quatre méthodes développées dans ce mémoire ne permettent pas de tester l'impact d'une politique précise de transport sur les émissions de GES. Des bases de méthodologie ont été présentées en section 2.3 et celles-ci ont mis en évidence la nécessité d'utiliser un modèle de choix modal calibré pour Montréal prenant en compte les différents modes de transports la ville : automobile, vélo, marche, métro, bus, train... Il serait notamment pertinent d'utiliser un modèle qui prend en compte la structure des chaînes de déplacement. La conception d'un modèle de ce type, se basant sur les données de l'enquête OD montréalaise, a notamment été étudié par Sicotte (2014).

Un tel modèle n'est pas disponible pour le moment mais est à l'étude au sein de la Chaire mobilité et de la Chaire de recherche du Canada sur la Mobilité des personnes. Dans le futur, il devrait donc y avoir des données et modèles intéressants afin de développer ce type de scénarios.

4.3.1.2 Scénario « Covoiturage »

La méthodologie du scénario « Covoiturage » proposée dans ce mémoire néglige plusieurs paramètres afin de simplifier cette première étude. Celle-ci pourrait donc être améliorée dans le futur selon plusieurs points.

L'algorithme pourrait notamment intégrer la notion de chaîne de déplacements, en tenant compte du fait qu'un individu peut avoir besoin d'utiliser son véhicule plus tard dans la journée avant de retourner à son domicile. Pour obtenir des résultats plus réalistes, il serait par exemple pertinent de privilégier le transfert des passagers vers des véhicules dont les conducteurs ne peuvent pas se passer, afin de s'assurer qu'aucun individu ne se retrouve sans moyen de transport pour le reste de la journée.

Par ailleurs, une identification plus rigoureuse des véhicules et une vérification de leur cohérence tout au long de la simulation sont essentielles pour assurer la fiabilité du modèle. Actuellement, une incohérence demeure possible : un individu peut être transféré dans le véhicule d'un autre ménage pour un premier trajet, rendant ainsi son propre véhicule indisponible. Or, dans la suite de l'exécution de l'algorithme, cette indisponibilité n'est pas prise en compte, ce qui peut conduire à des situations irréalistes où un individu semble toujours disposer de son véhicule alors qu'il l'a temporairement abandonné. Cette limitation rend le modèle plus proche d'un service d'autopartage, où des flottes de véhicules sont mises à disposition pour être louées en libre-service dans la ville, plutôt que d'un véritable covoiturage, où les trajets sont effectués avec les véhicules personnels des ménages.

Concernant l'unité spatiale, les ZAT ont été choisies, mais un découpage plus adapté pourrait être envisagé. L'analyse de sensibilité menée par Verreault et Morency (2016) met en évidence l'influence de l'Unité Spatiale (US) sur les résultats, ce qui pourrait inspirer une réévaluation de cette segmentation.

Enfin, une meilleure compréhension des comportements des usagers serait précieuse. Il serait pertinent d'interroger la population montréalaise sur des aspects clés du covoiturage : les distances qu'ils sont réellement prêts à parcourir pour rejoindre un site, leur disposition à accueillir d'autres passagers dans leur véhicule ou encore leur volonté d'embarquer à bord d'un véhicule tiers. Ces informations permettraient d'obtenir des premières données de calibrage du modèle et d'améliorer son réalisme.

4.3.1.3 Scénario « Modes actifs »

Le scénario « Modes actifs » pourrait également être affiné. Ici, la méthode repose principalement sur la distance des déplacements mais plusieurs paramètres importants sont négligés pour simplifier cette première approche. C'est le cas notamment des pentes du trajet, des conditions météorologiques et de la disponibilité d'infrastructures adaptées (trottoirs, pistes cyclables...) qui sont pourtant des facteurs déterminants dans l'usage de ces modes. Les

facteurs non pris en compte dans cette étude contribuent à expliquer pourquoi le potentiel estimé n'a pas encore été atteint. Les stratégies de mobilité doivent être orientées de manière à agir sur ces éléments pour maximiser ce potentiel.

La méthode exposée ici se base en grande partie sur l'étude de Godefroy et Morency (2012). Depuis, la méthode a été enrichie par Morency et al. (2020a), et prend mieux en compte le transfert des trajets vers la marche ou le vélo. En effet, la plupart des méthodologies estiment le potentiel de la marche et du vélo de manière indépendante alors que certains trajets à pied pourraient également être réalisés à vélo selon plusieurs critères, et inversement. Dans ce mémoire, il est simplement supposé que les trajets sont transférés en priorité à la marche puis au vélo ; mais une approche plus sophistiquée est proposée dans l'étude de Morency et al. (2020a). Elle pourrait permettre de préciser les résultats présentés ici. Lorsqu'un trajet répond à la fois aux critères de la marche et du vélo, un processus de chevauchement est enclenché. Les données de l'enquête OD permettent de déterminer le nombre de trajets à vélo et à pied en fonction de la distance parcourue, en tenant compte des catégories d'âge et de genre. Ces données suivent une distribution lognormale. Lorsque le critère de chevauchement est appliqué, les trajets communs aux deux modes (marche et vélo) sont répartis proportionnellement en fonction de la part relative de chaque mode pour une distance donnée.

L'objectif du scénario « Modes actifs » est d'établir une limite supérieure du potentiel des modes actifs, en supposant une demande de déplacements constante, tout en sachant que ce potentiel sera difficile à atteindre. Il serait intéressant par la suite de faire apparaître sur la Carte Carbone des scénarios spécifiques d'encouragement aux modes actifs, comme la piétonnisation de rues en particulier ou l'ajout de pistes cyclables.

4.3.1.4 AIMSUN

Le modèle de circulation de l'arrondissement de Saint-Laurent est la base de tout le travail développé dans ce mémoire. Actuellement, seul un modèle mésoscopique conçu à partir de données de 2013 est disponible. Un modèle microscopique existe également, mais celui-ci

n'est pas calibré. L'utilisation d'un modèle microscopique pourrait par la suite être pertinent afin d'affiner le calcul des émissions, comme le détaille N. Stéphan dans son mémoire (2023) et cela pourrait permettre de simuler de nouveaux scénarios comme des scénarios influençant l'agressivité de la conduite ou la mise en place de mesure d'apaisement et de gestion de la circulation.

Une fois disponible, le modèle AIMSUN 2018 de l'arrondissement et les données issues de l'enquête OD 2018 permettront de comparer les résultats actuels avec ceux projetés, tout en analysant l'impact de l'ajout de certains scénarios de mobilité. Bien qu'il sera difficile d'isoler l'impact d'un projet en particulier, la résolution spatiale et horaire fine pourrait permettre de commencer à discerner des tendances et à effectuer des analyses pertinentes.

Les scénarios testés dans ce travail visaient à réduire le nombre de véhicules en circulation, et donc la demande en transport, notamment durant l'heure de pointe du matin. Afin de rester cohérent avec les données de l'enquête OD, seules les données de déplacements démarrant entre 7 h et 8 h ont été conservées. Or, une première série de simulations effectuée sur une durée d'une heure (de 7h à 8h) a mis en évidence un comportement paradoxal : malgré la réduction du nombre de véhicules, les émissions de GES augmentaient. Cette augmentation s'explique par la diminution de la congestion, qui rend la circulation plus fluide et permet aux véhicules de parcourir davantage de distance en une heure.

Pour corriger cet effet et mieux refléter l'impact réel des scénarios, la durée de simulation a été étendue à 1h30. Cela a permis aux véhicules d'arriver plus largement à destination et de prendre en compte la globalité des trajets démarrant entre 7 h et 8 h. Cette approche permet de mieux évaluer les réductions d'émissions permises par les différents scénarios.

4.3.1.5 MOVES

Le logiciel MOVES permet une très grande personnalisation des données d'entrée du modèle d'émissions. Une possibilité, afin d'obtenir des résultats plus précis, serait d'enrichir la base

de données, par exemple en y intégrant des cycles de conduite typiques de la conduite à Montréal. De plus, dans ce mémoire, seuls les véhicules à essence, au diesel et électrique sont considérés ; mais il y a des possibilités de préciser encore plus l'analyse en y intégrant par exemples les véhicules hybrides ou des types de carburants plus rares. De plus, pour simplifier cette première analyse, la flotte de véhicules a été considérée comme n'étant constituée que de véhicules légers, ce qui conduit à une sous-estimation des émissions de CO₂ associées. L'étude devrait donc être affinée en considérant également les camions lourds et les bus.

Il pourrait aussi être intéressant de mesurer les émissions d'autres gaz à effet de serre, puisque MOVES le permet.

4.3.2 Enjeux sur les données

L'enquête OD est la base de données principale utilisée dans ce travail. Si celle-ci est très riche, l'ajout d'informations supplémentaires pourrait être intéressant. Par exemple, le nombre de passagers par véhicule n'est pas directement accessible et pourrait être ajouté au questionnaire. Ce serait également pertinent de savoir si les passagers sont des membres du ménage ou non, notamment afin d'identifier les trajets effectués en covoiturage. Une autre donnée intéressante serait de savoir si des services de vélopartage ou d'autopartage ont été utilisés pour réaliser un déplacement.

Une des principales difficultés de ce travail de recherche était l'hétérogénéité des différentes sources de données et modèles utilisés. Chaque jeu de données peut avoir son propre format, sa propre structure et son propre système de référence, ce qui nécessite un travail de normalisation préalable. Ce processus de formatage est parfois complexe et peut engendrer des incohérences ou des erreurs. De plus, il n'a pas été aisé de récupérer toutes les données nécessaires et les travaux précédemment effectués car les données provenaient de plusieurs sources différentes (ARTM, MTMD, Chaire de Mobilité, SUM...). Cela met en lumière la nécessité de centraliser la documentation et les banques de données importantes dans le cadre de la Carte Carbone. Par ailleurs, le travail effectué par le MTMD et le SUM sur les matrices

Origine-Destination et les modèles de circulation mériterait une documentation plus détaillée et plus transparente afin de faciliter sa reproduction.

4.3.3 Estimation de l'impact des scénarios à haute résolution temporelle

Afin d'obtenir un inventaire avec une résolution temporelle fine couvrant l'ensemble d'une année, il est nécessaire de développer une méthode permettant d'extrapoler temporellement les données de circulation disponibles. La réalisation de cet objectif a été étudié par Audrey Eck, dont le mémoire de maîtrise est disponible dans [Espace ETS](https://espace.etsmtl.ca/) (<https://espace.etsmtl.ca/>). La suite du projet de la Carte Carbone impliquera donc la mise au point d'une méthode permettant de combiner son projet et le mémoire ici présent, afin de pouvoir simuler l'impact d'un scénario à n'importe quel moment de l'année.

A première vue, l'intégration de sa méthodologie à la modélisation de scénarios pourrait se faire ainsi pour les scénarios modes actifs et covoiturage : une fois le nouveau trafic simulé sur AIMSUN, les débits routiers seront récupérés en sortie du modèle et extrapolés temporellement à partir de la méthode développée par A. Eck (2025). Un des enjeux de la méthode sera de réussir à déterminer les nouvelles vitesses moyennes à haute résolution spatio-temporelle sur chaque section. Ensuite, les données extrapolées de débits et de vitesses pourront être intégrées dans MOVES afin de suivre la méthode générale présentée dans ce mémoire.

4.3.4 Visualisation des résultats et stratégie de communication

La carte carbone est destinée à être un outil visuel et intuitif permettant de sensibiliser les populations. Cependant, sa conception soulève plusieurs défis liés à la représentation et l'interprétation des résultats des émissions sur la carte. L'un des premiers enjeux concerne la sémiologie graphique utilisée pour afficher les résultats. Il est crucial de définir un code couleur, une légende et des symboles permettant une lecture claire et accessible des niveaux d'émissions. Par exemple, si un gradient de couleurs allant du clair au foncé est utilisé pour représenter l'intensité des émissions de GES, la question des seuils de référence se pose. Il est

nécessaire de choisir à partir de quel niveau il est considéré sur la carte que les émissions sont préoccupantes. Il faudrait donc s'appuyer sur des valeurs critiques issues de la littérature scientifique pour établir ces seuils. De plus, pour améliorer la perception des ordres de grandeur, il est essentiel d'associer les résultats à des valeurs concrètes et parlantes, au lieu de simplement indiquer une quantité brute d'émissions en tonnes de CO₂.

Un autre défi réside dans la résolution spatiale des données affichées sur la carte. Les niveaux d'émissions varient considérablement selon le type d'infrastructure routière, notamment entre les autoroutes, pour lesquelles le volume de circulation est élevé et les émissions de GES très importantes et les petites routes locales pour lesquelles le trafic est bien plus faible et les émissions de GES moindres. Ainsi, il est difficile de présenter les résultats avec une échelle très détaillée puisque l'étendue des résultats d'émissions est très importante.

De plus, une agrégation trop grossière masque des variations importantes entre différents scénarios lors de la visualisation de ces derniers sur la carte, car, en général, les plus fortes réductions d'émissions se concentrent sur la borne la plus haute de l'échelle. Pour répondre à cet enjeu, une approche comparative a été privilégiée dans ce mémoire : plutôt que de représenter directement les émissions absolues, la carte affiche les différences d'émissions entre un scénario modélisé et la situation de référence. D'autres alternatives pourraient également être explorées, comme l'utilisation de légendes différenciées selon le type de route.

Enfin, limiter la carte aux seules émissions de CO₂ peut restreindre la compréhension des impacts des scénarios. Il pourrait être pertinent d'intégrer d'autres indicateurs clés, tels que le taux d'occupation des véhicules, pour évaluer l'efficacité du covoiturage ou les parts modales, afin de visualiser l'évolution des modes de transport privilégiés dans chaque scénario. Ces ajouts permettraient une lecture plus complète des impacts des mesures de mobilité durable testées. De plus, il serait judicieux de pouvoir mettre en parallèle les résultats des scénarios et les objectifs de décarbonation de la Ville de Montréal.

CONCLUSION

La Chaire de recherche du Canada sur la mesure de l'impact des activités humaines sur les changements climatiques développe actuellement l'outil de la Carte Carbone : un inventaire cartographique en ligne des émissions de GES de la Ville de Montréal. Cet outil vise notamment à permettre l'évaluation de l'impact de différents scénarios de décarbonation. Le premier secteur à l'étude du projet est celui du secteur routier : premier contributeur des émissions de GES du Québec et de la Ville de Montréal, il présente un grand potentiel d'atténuation dans la lutte contre les changements climatiques. Ce mémoire s'inscrit donc dans la volonté de développer des méthodes de modélisation de scénarios de mobilité sur la Carte Carbone.

Pour ce faire, différentes mesures de réduction des émissions de GES des transports ont été étudiées. Un état des lieux de la littérature sur la modélisation de ce type de scénario a été réalisé et des ébauches de méthodologie adaptées au contexte de la Carte Carbone ont été dressées pour les scénarios les plus fréquents. Parmi eux, quatre scénarios ont été sélectionnés : ces derniers font l'objet d'une étude approfondie. Il s'agit de l'augmentation de l'usage des modes actifs, l'augmentation de la pratique du covoiturage, l'électrification de la flotte de véhicules et l'augmentation de la teneur en éthanol dans les carburants essence. Ces scénarios ont été modélisés en s'appuyant sur les données et les modèles disponibles actuellement pour la Carte Carbone. Une première base de méthodologie efficace et répliquable pour la modélisation de scénarios de mobilité a ainsi pu être mise au point.

Cette étude a donc permis l'élaboration de méthodes pour estimer de premiers potentiels de réduction d'émissions de GES sur l'arrondissement de Saint-Laurent lors de la pointe du matin. Une distinction a été établie entre deux types de scénarios : d'une part, ceux visant à réduire la distance parcourue par les véhicules, et d'autre part, ceux cherchant à diminuer les émissions de GES produites par ces derniers. Le premier type correspond aux scénarios les plus complexes à modéliser, et peuvent être par exemple une piétonnisation de rue, l'ajout d'une

nouvelle ligne de transport en commun, ou la réduction du nombre de stationnements. Ces scénarios impactent directement la demande en transport en venant modifier les habitudes de mobilité de la population. D'un point de vue de la modélisation, cela requiert généralement l'utilisation d'un modèle de choix modal afin de réattribuer les modes de transport aux individus de la simulation. Dans le cas précis de la Carte Carbone, cela demande au minima une modification des matrices OD du modèle de circulation. Le deuxième type de scénarios correspond plutôt à des changements de technologie des véhicules ou de gestion de la circulation ; meilleure efficacité des véhicules, changement de moteur ou de carburant, infrastructure limitant la congestion. Ces scénarios demandent moins d'étapes de modélisation. Pour la plupart, ils se limiteront sur la Carte Carbone à une modification des paramètres du modèle d'émissions MOVES.

Les premières estimations et comparaison d'émissions de GES associées à des scénarios de mobilité ont permis de constater que le scénario lié à la composition du carburant essence est bien moins efficace que les autres scénarios à l'étude et que combiner des scénarios entre eux permet de maximiser le potentiel de réductions d'émissions. L'importance d'une modélisation fine et localisée pour saisir la complexité des dynamiques territoriales a également été soulignée. En effet, un scénario globalement favorable peut entraîner localement une hausse des émissions sur certaines sections du réseau, témoignant de la nécessité d'outils de visualisation à haute résolution tels que la Carte Carbone.

Le couplage entre les différentes étapes de modélisation a été facilité, dans le cadre de ce mémoire, par le développement de plusieurs algorithmes. Ceux-ci incluent : des algorithmes de traitement des données de l'enquête Origine-Destination pour les scénarios « Modes actifs » et « Covoiturage » ainsi que pour l'ajustement de la matrice OD ; un algorithme de formatage des sorties issues d'AIMSUN et des données de la SAAQ, permettant de produire des fichiers compatibles avec le modèle MOVES ; et enfin, un algorithme de calcul des émissions de GES sur chaque section du réseau de l'arrondissement de Saint-Laurent, à partir des résultats des simulations AIMSUN et MOVES.

Des axes d'amélioration importants ont pu être identifiés afin de tendre vers la création d'un outil plus fiable, plus intéressant et plus accessible. Dans un premier temps, une fonctionnalité très plébiscitée est l'évaluation de l'impact de mesures de mobilité précises et localisées, ayant trait notamment au transport en commun. Pour que de tels scénarios puissent être modélisés, il est essentiel de disposer d'un modèle de choix modal calibré pour la Ville de Montréal. La Chaire de Mobilité étant en train de travailler sur un outil de ce type, cela pourrait être une piste à intégrer au projet de la Carte Carbone.

Ensuite, il est très important pour obtenir des données fiables de prendre en compte l'évolution des tendances sociodémographiques futures de la population, puisque celles-ci pourraient avoir un impact considérable sur les émissions de GES du transport. La méthode développée dans ce mémoire ne permet pour le moment pas de les prendre en compte et considère que les scénarios sont appliqués directement à l'année d'étude en gardant la même population et le même réseau routier. Une solution serait d'utiliser les matrices de prévision développées par le MTMD.

Ce mémoire a mis en lumière la nécessité de combiner plusieurs mesures afin d'obtenir des résultats intéressants de réduction d'émissions. Néanmoins, l'approche utilisée fait l'hypothèse que les trajets sont transférés en priorité à la marche, puis au vélo et enfin au covoiturage. Celle-ci est acceptable dans le cadre de l'estimation de potentiel maximum de réduction, mais ne serait pas très réaliste si l'impact précis de scénarios de transport était évalué. En effet, cette démarche gomme des interactions complexes entre les différents modes de transport ; la modélisation combinée de plusieurs scénarios nécessiterait donc une étude à part entière.

Par ailleurs, il est essentiel de centraliser et de documenter l'ensemble des sources de données mobilisées dans le cadre de la Carte Carbone, celles-ci étant jusqu'ici particulièrement variées et hétérogènes. Le travail réalisé dans ce mémoire s'est inscrit dans cette démarche, en veillant à structurer et à expliciter les méthodes employées afin d'en faciliter la reproductibilité.

Un enjeu majeur de la Carte Carbone réside dans sa capacité à devenir un outil visuellement accessible, simple d'utilisation, et apte à servir à la fois la sensibilisation du public et l'aide à la décision. Dans cette optique, des recommandations initiales ont été formulées, accompagnées de premières propositions cartographiques. Toutefois, cette dimension mérite à elle seule une étude approfondie. La Chaire de recherche du Canada sur la mesure de l'impact des activités humaines sur les changements climatiques a déjà amorcé ce travail en organisant des ateliers de co-construction avec divers acteurs de la mobilité citoyenne, afin de s'assurer que la carte réponde à leurs besoins et s'ancre au-delà du seul milieu académique.

En conclusion, ce mémoire pose les bases méthodologiques d'un outil de simulation de scénarios de décarbonation du transport à l'échelle d'un arrondissement montréalais. Il met en évidence l'intérêt de scénarios combinés, la nécessité de modèles plus complets (notamment de choix modal) et l'importance d'un accès simplifié aux données. Enfin, il souligne le rôle crucial de la communication dans la démocratisation de la donnée climatique. En ce sens, la Carte Carbone a le potentiel de devenir un véritable levier d'action collective, au croisement de la science, des politiques publiques et de la participation citoyenne.

ANNEXE I

APERÇU DE LA LITTÉRATURE TRAITANT DE LA MODÉLISATION ET L'ESTIMATION DE L'IMPACT DE SCÉNARIOS DE MOBILITÉ

Tableau-A I-1 Aperçu de la littérature traitant de la modélisation et l'estimation de l'impact de scénarios de mobilité

Référence	Alam et al. (2014a)	Alam et al. (2014b)
Sujet	Impact sur les émissions de circulation et sur la qualité de l'air de scénarios de changement de la flotte de véhicules, de la demande en transport et du réseau routier dans des quartiers denses	Impact de l'usage de carburants alternatifs et de mesures d'aménagements routiers sur les émissions de GES des autobus
Scénarios modélisés	(S1) Renouvellement de la flotte de véhicules : 50% des véhicules ayant entre 15 et 30 ans sont remplacés par des véhicules ayant entre 0 et 5 ans. (S2) Piétonnisation de six rues locales. (S3) Trafic interne réduit : Réduction de 50 % des déplacements automobiles ayant pour origine et destination le quartier du Plateau. (S4) Demande réduite : Réduction de 50 % du nombre de déplacements entrant dans l'arrondissement. (S5) Trafic passant réduit : Réduction de 50 % des déplacements automobiles traversant l'arrondissement	(S0) Remplacement du fioul à très basse teneur en soufre par du gaz naturel comprimé (S1) Ajout de signalisation prioritaire pour les transports collectifs (S2) Relocalisation des arrêts de bus (S3) Scénario 1 et 2 combinés (S4) Ajout de voies d'évitement de file d'attente (S5) Scénarios 1, 2 et 4 combinés
Contexte de l'étude	Période : 7 h à 8 h Zone : Montréal, Plateau Mont-Royal Mode de transport : automobile	Période : 7 h à 9 h, printemps 2011 Zone : chemin de la Côte des neiges, Montréal (arrondissement Ville-Marie et Côte-des-Neiges-Notre-Dame-de-Grâce) Mode de transport : bus
Base de données utilisées	Enquête OD	Collecte de données avec GPS embarqué et données de la STM
Modèles utilisés	Modèle de circulation : PTV VISUM et PTV VISSIM DTA mode Modèle d'émissions : MOVES Modèle de dispersion	Modèle de circulation : PTV VISSIM Modèle d'émissions : MOVES Modèle de dispersion
Indicateurs évalués	Émissions CO ₂ -eq, NO _x et CO	CO ₂ -eq, PM _{2.5}

Tableau-A I-1 Aperçu de la littérature traitant de la modélisation et l'estimation de l'impact de scénarios de mobilité (suite)

Référence	El Hajjaji (2020)	Gai et al. (2020)	Ghafghazi et al. (2014)
Sujet	Impact de projets de transport en commun sur les émissions de GES de Montréal	Impact sur le climat et la santé de l'électrification de la flotte de véhicules d'une ville	Impact sur la qualité de l'air d'aménagements de modération de la circulation dans un quartier dense
Scénarios modélisés	(S1) Prolongement de la ligne bleue (S2) Ajout de la ligne rose du métro de Montréal (S3) Ajout du tramway de l'Est de Montréal	(S1) Pénétration des véhicules électriques de 25 %, toute l'énergie supplémentaire pour les véhicules électriques est fournie par des centrales électriques au gaz naturel. (S2) Pénétration des véhicules électriques de 100 %, toute l'énergie supplémentaire pour les véhicules électriques est fournie par des centrales électriques au gaz naturel. (S3) Pénétration des véhicules électriques de 100 %, toute l'énergie supplémentaire pour les véhicules électriques est fournie par des sources renouvelables.	(S1) Ajout de ralentisseurs (S2) Ajouts de plateaux traversants (S3) Diminution de limites de vitesse
Contexte de l'étude	Période : une journée typique d'automne Zone : Est de Montréal Modes de transport : transport en commun et automobile	Période : année 2013 Zone : the Greater Toronto and Hamilton Area (GTHA) Mode de transport : automobile	Période : octobre 2011 Zone : Montréal, Plateau Mont-Royal Mode de transport : automobile
Base de données utilisées	Enquêtes OD 2003 et 2013	Transportation Tomorrow Survey 2013	Enquête OD 2008
Modèles utilisés	Pas de modèle utilisé. Utilisation d'une approche empirique en se basant sur les résultats d'un projet déjà réalisé (prolongement de la ligne orange)	Modèle de dispersion	Modèle de circulation : PTV VISUM (mésoscopique) et PTV VISSIM (microscopique), DTA Modèle d'émissions : MOVES Modèle de dispersion
Indicateurs évalués	Km automobiles évités et générés Émissions de CO ₂ -eq	PM _{2.5} et PM ₁₀ , NH ₃ , NO _x , CO, VOCs, SO ₂	Émissions NO _x Concentration NO ₂

Tableau-A I-1 Aperçu de la littérature traitant de la modélisation et l'estimation de l'impact de scénarios de mobilité (suite)

Référence	Miotti et al. (2021)	Morency et al. (2020b)	Morency et al. (2020a)
Sujet	Impact de l'écoconduite sur les émissions de GES d'un véhicule	Impact sur l'usage des transports actifs et de l'automobile de scénarios de planification urbaine en transport en commun en 2031	Estimations de trajets latents à vélo et à pied en ville
Scénarios modélisés	Modification de cycles de conduite typiques pour une conduite plus douce de type écoconduite	(S1) Scénario PMAD : augmentation de 38,5 % du nombre d'habitants sur l'île de Montréal, installation de 36,8 % des nouveaux ménages près des TOD, amélioration du réseau de transport en commun (prolongation du métro, Bus Rapid transit, tramway) (S2) Installation de tous les nouveaux ménages près des TOD (S3) Installation des nouveaux ménages dans les zones à actuelle haute densité de Montréal	Réduction du nombre de voyage en automobile au profit des modes actifs : transfert des trajets en automobile réalisables en modes actifs à la marche et au vélo selon des critères de distance, d'âge, de genre et de structure de la chaîne de déplacements.
Contexte de l'étude	Période : - Zone : - Mode de transport : automobile	Période : 2031 Zone : Région métropolitaine de Montréal Modes de transport : automobile, marche, vélo, transit	Période : journée de semaine Zone : Grande Région de Montréal Modes de transport : automobile, vélo, marche
Base de données utilisées	2017 <i>National Household Travel Survey</i> Base de donnée de cycles de conduite typiques	Enquête OD 2008	Enquête OD de 2013
Modèles utilisés	Algorithme de modification de l'agressivité d'un cycle de conduite	Modèle de choix modal : multinomial logit	Pas de modèles utilisés.
Indicateurs évalués	Émissions de GES	Nombre de trajets et distances parcourues quotidiennement par modes de transport	Nombre de déplacements latents, parts modales

Tableau-A I-1 Aperçu de la littérature traitant de la modélisation et l'estimation de l'impact de scénarios de mobilité (suite)

Référence	Saoudi Hassani (2015)	Shekarrizfard et al. (2017)	Sider et al. (2014)
Sujet	Mobilité des travailleurs et scénarios de gestion des déplacements faits en automobile	Impact d'investissements dans les transports en commun et de changements de mobilités individuelles sur la qualité de l'air	Impact de mesures de piétonnisation sur les émissions de circulation
Scénarios modélisés	Scénario d'optimisation des liens domicile-travail, en termes d'éloignement domicile-travail, (S1) Relocalisation des ménages en minimisant l'éloignement au lieu de travail avec prise en compte de la taille du ménage. (S2) S1 avec prise en compte de la préférence logement constatée à partir de données d'enquêtes (S3) S2 avec prise en compte du statut d'occupation (propriétaire ou locataire). Proposition de méthodologies pour scénario de covoiturage et scénario de télétravail	Ajout des futurs projets de transport en commun du PMAD (REM, tramway, métro ligne rose et prolongation des lignes de métro bleue et orange).	(S1) Piétonnisation d'un corridor (S2) Piétonnisation à l'échelle d'une zone sans prise en compte des changements de la demande en transport (S3) Piétonnisation à l'échelle d'une zone avec prise en compte des changements de la demande en transport
Contexte de l'étude	Période : journée de semaine Zone : région métropolitaine de Montréal Mode de transport : automobile	Période : 2008, 2031 Zone : Région métropolitaine de Montréal Modes de transport : automobile, marche, vélo, transit, combinaison de ces modes	Période : 7 h à 8 h Zone : Montréal, Plateau Mont-Royal (50 ZAT) Mode de transport : automobile
Base de données utilisées	Enquête Origine-Destination de 2008 et Enquête Nationale des Ménages de 2011	Enquête OD 2008	Enquête OD 2008
Modèles utilisés	Modèle de relocalisation des ménages afin de minimiser la distance au lieu de travail.	Modèle de choix modal : Multinomial logit Modèle de circulation : PTV VISUM stochastic user equilibrium (SUE) Modèle d'émissions : MOVES Modèle de dispersion	Modèle de circulation : PTV VISUM et VISSIM Dynamic Traffic Assignment, mésoscopique et microscopique Modèle d'émissions : MOVES
Indicateurs évalués	Coût de navettage en personne km et distance de navettage en km	Émissions NOx Concentration NO2	Émissions CO ₂ -eq

Tableau-A I-1 Aperçu de la littérature traitant de la modélisation et l'estimation de l'impact de scénarios de mobilité (suite)

Référence	Smargiassi et al. (2020)	Tétreault et al. (2018)	Thomas et al. (2024)
Sujet	Impact environnemental et sanitaire de scénarios de transports et d'usage des sols en 2061	Impact d'investissements dans les transports en commun sur la santé	Impact de l'utilisation de différents modes de transport sur les émissions de GES
Scénarios modélisés	(S1) Installation de 100 % des nouveaux habitants en centre-ville et ajout des futurs projets de transport en commun du PMAD (REM, tramway, métro ligne rose et prolongation des lignes de métro bleue et orange). (S2) Scénario 1 avec ajout de télétravail.	Ajout des futurs projets de transport en commun du PMAD (REM, tramway, métro ligne rose et prolongation des lignes de métro bleue et orange).	Réduction du nombre de voyages en automobile au profit d'autres modes : évaluation du potentiel de transfert modal selon différents critères de distance de trajet, augmentation de la capacité des transports en commun, de l'accessibilité des modes de transport alternatifs,
Contexte de l'étude	Période : 2031 et 2061 Zone : la Grande Région de Montréal : les résultats sont agrégés par municipalité et par ZAT Modes de transport : automobile, marche, vélo, transit, combinaison de ces modes	Période : 2008, 2031 Zone : Grande Région de Montréal Modes de transport : automobile, marche, vélo, transit, combinaison de ces modes	Période : 7 jours en 2019 Zone : Londres Modes de transport : automobile, moto, marche, vélo, train, bus
Base de données utilisées	Enquête OD 2008	Enquête OD 2008 Enquête TOPO 2012	<i>National Travel Survey</i> (NTS)
Modèles utilisés	Modèle de choix modal : Multinomial logit Pas de modèle de circulation, mais une estimation du nombre de kilomètres parcourus entre chaque zone d'agrégation Modèle d'émissions : MOVES Modèle de dispersion	Modèle de choix modal : Multinomial logit Modèle de circulation : PTV VISUM stochastic user equilibrium Modèle d'émissions : MOVES Modèle de dispersion	Pas de modèle utilisé. Utilisation d'un algorithme choisissant le mode de transport le plus efficace et le moins émissif pour un déplacement spécifique. Utilisation de facteurs d'émissions moyens par modes de transport.
Indicateurs évalués	Émissions CO ₂ -eq et NOx Concentration NO ₂ , DALY Nombre d'accidents de la route	Émissions NOx Concentrations NO ₂ Accidents de la route DALY Temps moyen hebdomadaire consacré au transport actif	Transfert modal en passager km Potentiel de réduction d'émissions de GES

Tableau-A I-1 Aperçu de la littérature traitant de la modélisation et l'estimation de l'impact de scénarios de mobilité (suite)

Référence	Tu et al. (2018)	Verreault et Morency (2016)	Wang et al. (2016)
Sujet	Impact de politiques visant les trajets fortement émetteurs sur les émissions de GES	Estimation du potentiel de covoiturage à Montréal et ses impacts sur la mobilité	Impact de politiques de développement des transports en commun sur les parts modales, les distances de trajets et l'usage des autoroutes
Scénarios modélisés	(S1) Encouragement au transport actif : suppression des déplacements automobiles d'une distance de moins de 600 m ; (S2) Taxe sur les déplacements à émissions élevées : suppression des déplacements dont les émissions sont supérieures à 1,75 kg de CO ₂ ; (S3) Moins de congestion : suppression des déplacements dont les émissions de CO ₂ eq supérieures à 500 g/VKT.	Mise au point d'un algorithme permettant de jumeler des trajets semblables selon des critères spatio-temporels afin d'identifier les passagers pouvant covoiturer ensemble.	(S1) Relocalisation de la croissance des ménages des zones non desservies vers des zones de transit avec une localisation de l'emploi inchangée ; (S2) Relocalisation de la croissance de l'emploi avec localisation des ménages inchangée ; (S3) Relocalisation de la croissance des ménages et de l'emploi des zones non desservies vers les zones de transit.
Contexte de l'étude	Période : 6 h à 12 h d'une journée de semaine de juin 2011 Zone : <i>Greater Toronto Area</i> Mode de transport : automobile	Période : journée de semaine d'automne 2013 Zone : Région métropolitaine de Montréal Modes de transport : automobile, transport en commun	Période : 2030 Zone : Etat du Maryland, Etats-Unis Modes de transport : automobile et transit
Base de données utilisées	Transportation Tomorrow Survey	Enquête Origine-Destination 2013	Enquête sur les déplacements des ménages
Modèles utilisés	Modèle de circulation : Simulation microscopique AIMSUN Modèle d'émissions : MOVES Modèle de dispersion	Pas de modèle utilisé	Modèle de choix modal : Nested logit model Modèle de circulation : the Maryland Statewide Transportation Model (MSTM)
Indicateurs évalués	Emissions de CO ₂ eq et de NOx	Taux d'occupation des véhicules, nombres de trajets réalisés en automobile	VKT, parts modales

ANNEXE II

ALGORITHME DE COUPLAGE DE AIMSUN ET MOVES

Algorithme-A II-1 Algorithme de couplage de AIMSUN et de MOVES

```
couplage.py
001| import sqlite3
002| import openpyxl
003| import pandas as pd
004|
005| #ETAPE 1 : récupération des données dans la base de donnée AIMSUN et la base de
données de la SAAQ
006|
007| #étape préliminaire : ajouter la table details_sections à la base de donnée de
sortie d'AIMSUN
008|
009| #Connexion à la bdd et création du curseur
010|
011| conn = sqlite3.connect(r"C:\Users\X\Documents\simulation_AIMSUN.sqlite")
012|
013| curseur = conn.cursor()
014|
015| ##
016|
017| # Road Type Distribution : Permet d'entrer la fraction représentant la distance
parcourue par chaque type de véhicule sur chaque type de route.
018|
019| curseur.execute("""SELECT SUM(MESECT.travel)
020| FROM MESECT , details_sections
021| WHERE MESECT.oid = details_sections.sectionId AND MESECT.sid = 2 AND MESECT.ent
= 0
022| AND details_sections.typed_oute IN (258350 , 258351 , 258353 , 258360 );""")
023|
024| km_restreint = curseur.fetchone()
025|
026| curseur.execute("""SELECT SUM(MESECT.travel)
027| FROM MESECT , details_sections
028| WHERE MESECT.oid = details_sections.sectionId AND MESECT.sid = 2 AND MESECT.ent
= 0
029| AND details_sections.typed_oute NOT IN (258350 , 258351 , 258353 , 258360 );""")
030|
031| km_nonrestreint = curseur.fetchone()
032|
033| frac_restreint = km_restreint[0]/(km_restreint[0] + km_nonrestreint[0])
034| frac_nonrestreint = km_nonrestreint[0]/(km_restreint[0] + km_nonrestreint[0])
035|
036| colonne_rtd = [0, 0, frac_restreint, frac_nonrestreint]
```

```

038| ##
039|
040| # Source Type Population : Permet d'entrer le nombre de véhicules dans la
simulation.
041|
042| curseur.execute("""SELECT COUNT(DISTINCT(oid)) FROM MEVEHTRAJECTORY WHERE
MEVEHTRAJECTORY.sid = 197 ;""")
043|
044| nb_car = curseur.fetchone()
045|
046| ##
047|
048| # Vehicle Type VMT : Permet d'entrer la distance parcourue par les véhicules par
types de véhicules par jour.
049|
050| curseur.execute("""SELECT SUM(travelledDistance) FROM MEVEHTRAJECTORY WHERE
MEVEHTRAJECTORY.sid = 197 ;""")
051|
052| nb_m_car = curseur.fetchone()
053|
054| ##
055|
056| # Age Distribution : Fraction de véhicules par catégorie d'âge (0 à 30 ans et plus).
057|
058| # Base de données de la SAAQ
059| chemin_fichier = r"C:\Users\X\Documents\vehicule-en-circulation-SAAQ.xlsx"
060|
061| # Chargement du fichier dans un DataFrame
062| df = pd.read_excel(chemin_fichier)
063|
064| # Filtrer les lignes pour ne garder que celles où la colonne "REG_adm" est égale
à "montréal (06)"
065| df_montreal = df[df['REG_ADM'] == 'Montréal (06)'].copy()
066|
067| # Calcul de l'âge de chaque véhicule
068| annee_simu = 2013
069| df_montreal.loc[:, 'AGE'] = annee_simu - df_montreal['ANNEE_MOD']
070|
071| # Nombre de véhicules pour chaque âge
072| comptage_age = df_montreal['AGE'].value_counts().sort_index()
073|
074| index_a_suppr = []
075| for i in comptage_age.index :
076| if i not in range(0,31):
077| index_a_suppr.append(i)
078|
079| comptage_age2 = comptage_age.drop(index_a_suppr)
080|
081| # Calcul du pourcentage de véhicules pour chaque âge
082| pourcentage_age = (comptage_age2 / comptage_age2.sum())
083|
084| # Récupération des valeurs d'âge dans une liste
085| liste_age_distrib = []
086| for i in pourcentage_age.index :
087| liste_age_distrib.append(pourcentage_age[i])

```



```

088|
089| ##
090| # Fuel : distribution des différents type de carburant dans les stations service, composition des carburants,
091| répartition de l'utilisation de l'E-85 pour les véhicules pouvant l'utiliser, fractions d'utilisation des différents
092| carburants pour chaque type de véhicule de chaque catégorie d'âge et de chaque type de moteur
093|
094| # Filtre sur le DataFrame pour inclure uniquement les carburants E (essence), D (diesel) et L (électricité)
095| carburants_inclus = ['E', 'D', 'L']
096| df_filtre = df_montreal[df_montreal['TYP_CARBU'].isin(carburants_inclus)]
097|
098| # Groupement des données par année d'achat (ANNEE_MOD) et type de carburant
099| groupe = df_filtre.groupby(['ANNEE_MOD',
100| 'TYP_CARBU']).size().unstack(fill_value=0)
101|
102| # Calcul du pourcentage pour chaque année
103| pourcentage_fuel = groupe.div(groupe.sum(axis=1), axis=0)
104|
105| # à partir du tableau remplir une liste pour moves avec le bon ordre
106| liste_fuel = []
107|
108| for i in range(1960, annee_simu+1):
109|     liste_fuel.append(pourcentage_fuel.loc[i, "E"])
110|     liste_fuel.append(pourcentage_fuel.loc[i, "D"])
111|     liste_fuel.append(0)
112|     liste_fuel.append(pourcentage_fuel.loc[i, "L"])
113|
114| liste_fuel.extend([0]*164)
115|
116| ##
117| # Average Speed Distribution : Permet d'entrer une fraction de véhicule par type de route, pour chaque heure de
118| la simulation, et par type de véhicule dans chacune des catégories de vitesse.
119|
120| def count_records(curseur, type_roads, min_speed, max_speed):
121|
122|     # chaîne de caractères avec des marqueurs de paramètre pour chaque valeur de type_road
123|     type_road_str = ','.join(['?'] * len(type_roads))
124|
125|     sql = f"""
126|     SELECT COUNT(*) AS nombre_enregistrements
127|     FROM MEVEHSECTTRAJECTORY, details_sections2
128|     WHERE MEVEHSECTTRAJECTORY.sectionId = details_sections2.sectionId
129|     AND details_sections2.typed_oute IN ({type_road_str})
130|     AND details_sections2.longu_ur2d / MEVEHSECTTRAJECTORY.traveltime * 3.6
131|     >= ?
132|     AND details_sections2.longu_ur2d / MEVEHSECTTRAJECTORY.traveltime * 3.6
133|     < ? ;
134|     """
135|
136|     # liste qui contient les valeurs de type_road suivies de min_speed et max_speed
137|     params = type_roads + (min_speed, max_speed)
138|
139|     # Exécution de la requête
140|     curseur.execute(sql, params)
141|
142|     val = curseur.fetchone()

```

```

138|
139| if val[0] is None:
140|     return 0
141| else:
142|     return val[0]
143|
144| unrestricted_roads = (258352, 258354, 258355, 258356, 258357, 258357)
145| restricted_roads = (258350, 258351, 258353, 258360)
146| nb_voiture_triee = [[] for _ in range(2)]
147|
148| intervals = [
149|     (0, 4.023),
150|     (4.023, 12.070),
151|     (12.070, 20.117),
152|     (20.117, 28.164),
153|     (28.164, 36.210),
154|     (36.210, 44.257),
155|     (44.257, 52.304),
156|     (52.304, 60.350),
157|     (60.350, 68.397),
158|     (68.397, 76.444),
159|     (76.444, 84.491),
160|     (84.491, 92.537),
161|     (92.537, 100.584),
162|     (100.584, 108.631),
163|     (108.631, 116.677),
164|     (116.677, float('inf'))
165| ]
166|
167| # Restreint
168|
169| nb_car_restreint = count_records(curseur, restricted_roads, 0, float('inf'))
170|
171| for min_speed, max_speed in intervals:
172|     nb_voiture_triee[0].append(count_records(curseur, restricted_roads,
173| min_speed, max_speed))
174|
175| # Non-Restreint
176|
177| nb_car_non_restreint = count_records(curseur, unrestricted_roads, 0,
178| float('inf'))
179|
180| av_speed_distrib = [[], []]
181|
182| for i in range(len(nb_voiture_triee[0])):
183|     av_speed_distrib[0].append(nb_voiture_triee[0][i] / nb_car_restreint)
184|     av_speed_distrib[1].append(nb_voiture_triee[1][i] / nb_car_non_restreint)
185|
186| liste_asd = [1] + [0 for _ in range(15)] + [1] + [0 for _ in range(15)] +
187| av_speed_distrib[0] + av_speed_distrib[1]

```

```

187|
188| ##
189|
190| # Meteorology Data : une valeur de température et une valeur de taux d'humidité pour l'heure de simulation.
191|
192| temperature_fahrenheit = 39.1
193| humidite_pourcent = 85.2
194|
195| conn.close()
196|
197| ##
198|
199| # ETAPE 2 : remplissage des Excel de Moves
200|
201| # Récupération des templates à compléter
202|
203| templates = [r"C:\Users\X\Documents\Road_Type_Distribution.xlsx",r"C:
\Users\X\Documents\Source_Type.xlsx",r"C:\Users\X\Documents\VMT.xlsx",r"C:
\Users\X\Documents\Age_Distribution.xlsx",r"C:\Users\X\Documents\ASD.xlsx",r"C:
\Users\X\Documents\Fuel.xlsx", r"C:\Users\X\Documents\Meteo.xlsx"]
204|
205| # Road type
206| wb = openpyxl.load_workbook(templates[0])
207| feuille = wb.active
208| for i, valeur in enumerate(colonne_rtd):
209|     feuille.cell(row=2+i, column=3, value=valeur)
210|     nouveau_fichier = templates[0].replace(".xlsx", "_complete.xlsx")
211|     wb.save(nouveau_fichier)
212|     wb.close()
213|
214| # Source Type
215| wb = openpyxl.load_workbook(templates[1])
216| feuille = wb.active
217| feuille["C2"] = nb_car[0]
218| nouveau_fichier = templates[1].replace(".xlsx", "_complete.xlsx")
219| wb.save(nouveau_fichier)
220| wb.close()
221|
222| # VMT
223| wb = openpyxl.load_workbook(templates[2])
224| feuille = wb.worksheets[3]
225| feuille["A2"] = 21 #source type id
226| feuille["B2"] = 2013 #year id
227| feuille["C2"] = 10 #month id
228| feuille["D2"] = 5 #day id
229| feuille["E2"] = nb_m_car[0] * 0.621371 * 0.001 #distance travelled
230| feuille = wb.worksheets[6]
231|
232| for i, valeur in enumerate([1 for i in range(5)]):
233|     feuille.cell(row=2+i, column=5, value=valeur)
234|     nouveau_fichier = templates[2].replace(".xlsx", "_complete.xlsx")
235|     wb.save(nouveau_fichier)
236|     wb.close()
237|
238| # Age distribution
239| wb = openpyxl.load_workbook(templates[3])

```

```
240| feuille = wb.active
241|
242| for i, valeur in enumerate(liste_age_distrib):
243|     feuille.cell(row=2+i, column=4, value=valeur)
244|
245| nouveau_fichier = templates[3].replace(".xlsx", "_complete.xlsx")
246| wb.save(nouveau_fichier)
247| wb.close()
248|
249| # Fuel
250|
251| wb = openpyxl.load_workbook(templates[5])
252| feuille = wb['avft']
253|
254| for i, valeur in enumerate(liste_fuel):
255|     feuille.cell(row=2+i, column=5, value=valeur)
256|
257| nouveau_fichier = templates[5].replace(".xlsx", "_complete.xlsx")
258| wb.save(nouveau_fichier)
259| wb.close()
260|
261|
262| # ASD
263| wb = openpyxl.load_workbook(templates[4])
264| feuille = wb.active
265| for i, valeur in enumerate(liste_asd):
266|     feuille.cell(row=2+i, column=5, value=valeur)
267|     nouveau_fichier = templates[4].replace(".xlsx", "_complete.xlsx")
268|     wb.save(nouveau_fichier)
269|     wb.close()
270|
271| # Meteo
272| wb = openpyxl.load_workbook(templates[6])
273| feuille = wb.active
274| feuille["D2"] = temperature_fahrenheit
275| feuille["E2"] = humidite_pourcent
276| nouveau_fichier = templates[6].replace(".xlsx", "_complete.xlsx")
277| wb.save(nouveau_fichier)
278| wb.close()
```

ANNEXE III

ALGORITHME POUR VISUALISATION DES RESULTATS A HAUTE RESOLUTION SPATIALE

Algorithme-A III-1 Algorithme pour visualisation des résultants à haute résolution spatiale

```
# mode_taux.py
01| import geopandas as gpd
02| import json
03| import sqlite3
04| import pandas as pd
05| import openpyxl
06|
07| #Connexion à la bdd et création du curseur
08|
09| conn = sqlite3.connect(r"C:\Users\X\Documents\simulation_AIMSUN.sqlite")
10| curseur = conn.cursor()
11|
12| #unité distance : km
13| #unité vitesse : km/h
14| #unité taux : kg de CO2 par km
15|
16| requete_sql = "SELECT did, oid, sid, ent, speed, travel FROM MESECT WHERE ent ==
0 AND sid == 0;"
17| # ent = 0 : intervalles de temps agrégés et sid = 0 : tous types de véhicules
18| data = curseur.execute(requete_sql).fetchall()
19|
20| # Création d'un DataFrame avec les données récupérées
21| df_aimsun = pd.DataFrame(data, columns=['did', 'oid', 'sid', 'ent', 'speed',
'travel'])
22| conn.close()
23|
24| excel_section = r"C:\Users\X\Documents\details_sections.xlsx"
25| excel_taux = r"C:\Users\X\Documents\TAUX.xlsx" #output de la simulation moves
26|
27| taux = pd.read_excel(excel_taux)
28|
29| # intervalles de vitesses moyennes
30| intervals = [
31| (0, 4.023), (4.023, 12.070), (12.070, 20.117), (20.117, 28.164),
32| (28.164, 36.210), (36.210, 44.257), (44.257, 52.304), (52.304, 60.350),
33| (60.350, 68.397), (68.397, 76.444), (76.444, 84.491), (84.491, 92.537),
34| (92.537, 100.584), (100.584, 108.631), (108.631, 116.677), (116.677,
float('inf'))
35| ]
36|
37| labels = list(range(1, len(intervals) + 1))
```

```

38|
39| # attribution du numéro de l'intervalle à chaque valeur de vitesse
40| def avg_speedBinID(vitesse):
41| for i, intervalle in enumerate(intervals):
42| if vitesse >= intervalle[0] and vitesse < intervalle[1]:
43| return labels[i]
44|
45| #identifiants des types de route sur AIMSUN
46| data = {'X': [258350, 258351, 258353, 258360]}
47|
48| #harmonisation des types de routes AIMSUN vers MOVES
49| def road_type(val):
50| if val in [258350, 258351, 258353, 258360]:
51| return 4
52| else:
53| return 5
54|
55| # 4 = route restreinte (258350, 258351,258353,258360) / 5 = non-restreinte
56|
57| section['roadTypeID'] = section['typed_oute'].apply(road_type)
58|
59| aimsun['avgSpeedBinID'] = aimsun['speed'].apply(avg_speedBinID)
60|
61| aimsun_merge = pd.merge(aimsun, section, left_on='oid', right_on='sectionId',
62| how='inner')
63|
64| # Fusion des DataFrames sur les colonnes 'type de route' et 'vitesse moyenne'
65| resultat = pd.merge(aimsun_merge, taux, on=['roadTypeID', 'avgSpeedBinID'],
66| how='left')
67|
68| # Calcul des émissions sur chaque section (travel = distance parcourue sur la
69| section)
70| resultat['emissions'] = resultat['travel'] * resultat['ratePerDistance']
71|
72| resultat = resultat[[(resultat['emissions'] != 0) &
73| (~resultat['emissions'].isna())]]
74|
75| nomfichier = r'C:\Users\X\Documents\resultats_carte_carbone.csv'
76| resultat.to_csv(nomfichier, index=False)

```

ANNEXE IV

TABLEAUX 1 ET 2 RAPPORT DUNSKY, 2021

Tableau-A IV-1 Projection des ventes annuelles de véhicules légers (arrondis à la centaine)
jusqu'en 2030 de Dunsky, 2021

	Voitures			VUS			Camionnettes		
	2020	2025	2030	2020	2025	2030	2020	2025	2030
Scénario 1 ou 2	37 900	29 100	18 800	79 900	122 400	143 300	19 100	24 600	26 300
Scénario 2+	37 900	27 900	17 300	79 900	117 400	131 700	19 100	23 500	24 100

Tableau-A IV-2 Projection du nombre de véhicules électriques immatriculés dans la Ville de
Montréal jusqu'en 2030 de Dunsky, 2021

Année	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 2+
2013	238	238	238
2014	424	424	424
2015	762	762	762
2016	1 138	1 138	1 138
2017	1 489	1 489	1 489
2018	2 671	2 671	2 671
2019	4 331	4 331	4 331
2020	4 123	4 123	4 123
2021	6621	7 479	7 479
2022	10 106	13 129	13 140
2023	14 455	21 147	21 228
2024	19 236	31 192	31 755
2025	24 409	43 196	44 770
2026	30 459	57 472	60 620

Année	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 2+
2027	38 008	74 156	79 164
2028	47 585	93 569	100 684
2029	59 173	115 632	125 091
2030	72 665	140 135	151 969

ANNEXE V

DISTANCES SEUIL DE MARCHE ET DE VELO DU SCENARIO MODES ACTIFS

Tableau A V-1 Distances seuil de la pratique de la marche calculées à partir des données de l'Enquête OD 2013

Tranche d'âge	Genre féminin	Genre masculin
5 à 6 ans	0,89	0,83
7 à 8 ans	0,90	0,91
9 à 10 ans	0,96	0,95
11 à 12 ans	1,14	1,13
13 à 14 ans	1,58	1,82
15 à 17 ans	1,62	1,85
18 à 24 ans	1,98	2,06
25 à 40 ans	1,28	1,71
41 à 64 ans	1,89	1,79
65 à 74 ans	1,97	1,87
75 à 89 ans	1,59	1,5

Tableau A V-2 Distances seuil de la pratique du vélo calculées à partir des données de l'Enquête OD 2013

Tranche d'âge	Genre féminin	Genre masculin
5 à 12 ans	1,86	1,83
13 à 17 ans	5,33	4,69
18 à 40 ans	7,40	7,72
41 à 64 ans	6,97	8,68
65 à 74 ans	5,61	10,59

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADEME (2020). *Caractérisation des effets rebond induits par le télétravail – Synthèse*. Repéré à : <https://librairie.ademe.fr/societe-et-politiques-publiques/3776-caracterisation-des-effets-rebond-induits-par-le-teletravail.html>
- AIMSUN (2024a). Aimsun Next (Version 24.0.0) [Logiciel]. Repéré à : <https://www.aimsun.com/aimsun-next-downloads/>
- AIMSUN (2024b). *Stochastic Route Choice and Dynamic User Equilibrium*. Repéré à : <https://docs.aimsun.com/next/23.0.0/UsersManual/SRCAndDUE.html#dynamic-user-equilibrium-due>
- Alam, A., Ghafghazi, G. & Hatzopoulou, M. (2014a). Traffic Emissions and Air Quality Near Roads in Dense Urban Neighborhood Using Microscopic Simulation for Evaluating Effects of Vehicle Fleet, Travel Demand, and Road Network Changes. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2427(2427), 83-92. doi: 10.3141/2427-09
- Alam, A. & Hatzopoulou, M. (2014b). Reducing transit bus emissions: Alternative fuels or traffic operations ? *Atmospheric Environment*, 89. doi:10.1016/j.atmosenv.2014.02.043
- Arrondissement de Saint-Laurent. Bernier, M., Bousoffara, A. & Véronneau, A. (2017). *Plan local de déplacements*.
- ARTM (2020). *Enquête Origine-Destination 2018 - Faits saillants de l'état de la mobilité des personnes dans la région métropolitaine de Montréal*. Repéré à : https://www.artm.quebec/wp-content/uploads/2020/01/CA_Faits-saillants_EOD_COMPLET_WEB_14012020_R002.pdf
- ARTM (2022). *Département d'organisation et développement des réseaux. Guide d'utilisation des données d'enquête origine-destination 2018 (fichier niveau 2)*.
- ARTM (2024). *Enquête métropolitaine 2023 – Perspectives mobilité : faits saillants de l'état de la mobilité des personnes dans la région métropolitaine de Montréal*. Repéré à : https://www.artm.quebec/wp-content/uploads/2025/06/2634_ARTM_Enquete2023_FaitsSaillants_WEB_V2.pdf
- Barceló, J. (2010). *Fundamentals of Traffic Simulation* (Vol. 145) [Version SpringerLink]. doi: 10.1007/978-1-4419-6142-6_2
- Berry, I-M. (2010). *The Effects of Driving Style and Vehicle Performance on the Real-World Fuel Consumption of U.S. Light-Duty Vehicles*. (Thèse, Massachusetts Institute of

- Technology (MIT), Cambridge, Etats-Unis). Repéré à : <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/58392>
- Bourel, C. (2005). *Les impacts du métrobus de Québec, la question du report modal*. (Mémoire, Université Laval, Québec, Canada). Repéré à : <https://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk3/QQLA/TC-QQLA-22359.pdf>
- Bureau de la Transition Ecologique et de la Résilience, Ville de Montréal (2024). *Méthodologie d'inventaire des émissions de GES de la collectivité montréalaise*, Version 1.0. Repéré à : https://portail-m4s.s3.montreal.ca/pdf/vdm_inventaire_ges_collectivite_methodologie_1.pdf
- Bureau de la Transition Ecologique et de la Résilience, Ville de Montréal (2024). *Émissions de gaz à effet de serre de la collectivité montréalaise - Inventaire 2022*. Repéré à : https://portail-m4s.s3.montreal.ca/pdf/vdm_inventaire_ges_collectivite_2022.pdf
- Chaire Mobilité (2018). *Rapport d'activités 2014-2015, Version préliminaire*. Ecole Polytechnique Montréal. Repéré à : <https://www.polymtl.ca/mobilite/publications>
- CIRAIG (2016). *Rapport technique analyse du cycle de vie comparative des impacts environnementaux potentiels du véhicule électrique et du véhicule conventionnel dans un contexte d'utilisation québécois*. Repéré à : https://ciraig.org/wp-content/uploads/analyse-comparaison-vehicule-electrique-vehicule-conventionnel_compressed.pdf
- Communauté métropolitaine de Montréal (2012). *PMAD : Un grand Montréal attractif, compétitif et durable*. Repéré à : https://cmm.qc.ca/wp-content/uploads/2019/03/pmad_plan_metropolitain_aménagement_developpement.pdf
- Direction de la modélisation des systèmes de transport. Ministère des transports (2019). *Documentation sur le modèle de transport de la région de Montréal - MOTREM13*
- Dunsky (2021). *Diagnostic et modélisation de l'évolution du marché des véhicules électriques 2013-2030 – Rapport final*
- Eck, A. (2025). *Développement d'une carte carbone de Montréal - Modélisation améliorée du transport terrestre*. (Mémoire, ETS, Montréal, Canada). Manuscrit soumis pour publication.
- El Hajjaji, S. (2020). *Évaluation des réductions d'émissions de gaz à effet de serre (GES) associées à l'évolution des options de mobilité durable dans l'est de Montréal*. (Mémoire, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Canada). Repéré à : <https://usherbrooke.scholaris.ca/server/api/core/bitstreams/9a0fb8a5-981f-4d11-b709-1d0689d34f16/content>

- Eluru, N., Chakour, V. & El-Geneidy, A.M. (2012). Travel mode choice and transit route choice behavior in Montreal : insights from McGill University members commute patterns. *Public Transport*, 4(2), 129-149. doi: 10.1007/s12469-012-0056-2
- Environnement et Changement climatique Canada, Gouvernement du Canada (2016). L'Accord de Paris. Repéré à : <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/accord-paris.html>
- Fong, W. K., Sotos, M., Doust, M., Schultz, S., Marques, A. & Deng-Beck, C. (2021). *Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Inventories: An Accounting and Reporting Standard for Cities (Version 1.1)*. Greenhouse Gas Protocol. Repéré à https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/GPC_Full_MASTER_RW_v7.pdf
- Gagnon, L. (2006). *Comparaison des options énergétiques : Émissions de gaz à effet de serre des options de transport des personnes et des marchandises*. Hydro-Québec, Direction – Environnement. Repéré à : http://www.hydroquebec.com/developpementdurable/documentation/pdf/options_energetiques/transport_fr_2006.pdf.
- Gai, Y., Minet, L., Posen, D., Smargiassi, A., Tetreault, L.F. & Hatzopoulou, M. (2020). Health and climate benefits of Electric Vehicle Deployment in the Greater Toronto and Hamilton Area. *Environ Pollut.*, 265(Pt A):114983. doi: 10.1016/j.envpol.2020.114983
- Ghafghazi, G. & Hatzopoulou, M. (2014). Simulating the air quality impacts of traffic calming schemes in a dense urban neighborhood. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 35, 11-22. doi: 10.1016/j.trd.2014.11.014
- GIEC (2023). Synthèse du sixième rapport d'évaluation du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat. Repéré à : <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- Goldsmith, S. (1992). *Reasons why bicycling and walking are not being used more extensively as travel modes*. United States Federal Highway Administration. Office of Planning, Environment, and Realty. Repéré à : <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/41506>
- Godefroy, F. & Morency, C. (2012). Estimating Latent Cycling Trips in Montreal, Canada. *Transportation Research Record*, 2314(1), 120-128. doi : 10.3141/2314-16
- Golder Associés. (2016). *Rapport de quantification des émissions de gaz à effet de serre évitées par le transport collectif dans la région métropolitaine de Montréal (numéro de projet : 003-1542514Rev1)*. Repéré à http://www.stm.info/sites/default/files/pdf/fr/rapport_quantification_ges_evites.pdf
- Google (2024). <https://insights.sustainability.google/>

- Gouvernement du Canada (2022). Règlement sur les combustibles propres. Canada.ca. Repéré à : <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/gestion-pollution/production-energie/reglement-carburants/reglement-combustibles-propres/apropos.html>
- Gouvernement du Canada (2024). Biocarburants. Ressources Naturelles Canada. Repéré à : <https://ressources-naturelles.canada.ca/efficacite-energetique/efficacite-energetique-transports-carburants-remplacement/carburants-remplacement/biocarburants/21610>
- Gouvernement du Québec (2020). *Plan pour une Economie Verte 2030, Politique-cadre d'électrification et de lutte contre les changements climatiques*. Repéré à : <https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/environnement/publications-adm/plan-economie-verte/plan-economie-verte-2030.pdf>
- Gouvernement du Québec (2022). Mobilité Montréal. Repéré à : <https://mobilitemontreal.gouv.qc.ca/outils/covoiturage/>
- Gouvernement du Québec (2023a). Québec.ca, repéré à : <https://www.quebec.ca/nouvelles/actualites/details/lartm-lance-une-application-gratuite-de-covoiturage-47532>
- Gouvernement du Québec (2023b). LegisQuébec : Règlement sur l'intégration de contenu à faible intensité carbone dans l'essence et le carburant diesel, chapitre P-30.01, r. 0.1 : <https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/document/rc/P-30.01,%20r.%200.1%20/>
- Gouvernement du Québec (2024). *Guide méthodologique pour la réalisation d'un inventaire des émissions de GES d'un organisme municipal*. Repéré à : <https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/environnement/publications-adm/plan-economie-verte/programmes/accelerer-transition-locale/guide-methodologique-inventaire-ges-organisme-municipal.pdf>
- Gurney, K. R., Razlivanov, I., Song, Y., Zhou, Y., Benes, B. & Abdul-Massih, M. (2012). Quantification of Fossil Fuel CO₂ Emissions on the Building/Street Scale for a Large U.S. City. *Environmental Science & Technology*, 46(21), 12194-12202. doi: 10.1021/es3011282
- International Energy Agency (2023). *World Energy Outlook 2023*. Repéré à : <https://iea.blob.core.windows.net/assets/86ede39e-4436-42d7-ba2a-edf61467e070/WorldEnergyOutlook2023.pdf>
- Jarouche, F., Sioui, L., St-Pierre, B. & Tiomo, D. (2018). *Prévision Montréal 2036 - Scénario tendancier 2013-2036 (v1 mai 2017)*. Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports. Direction de la modélisation des systèmes de transport.

- Kishan, S., Fincher, S., Palacios, C., Preusse, D. & Perez, H. (2010). *Eastern Research Group, Inc. Final Report for: Modifying Link-Level Emissions Modeling Procedures for Applications within the MOVES Framework*. Submitted to: Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation. Repéré à : <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/53682>
- Ma, H., Xie, H., Huang, D. & Xiong, S. (2015). Effects of driving style on the fuel consumption of city buses under different road conditions and vehicle masses. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 41, 205-216. doi: 10.1016/j.trd.2015.10.003.
- Martel-Poliquin, E. (2012). *Mieux comprendre les déterminants du choix modal*. (Mémoire, École Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada). Repéré à : <https://publications.polymtl.ca/904/>
- Martel-Poliquin, E. (2020) *Direction de la modélisation des systèmes de transport, Ministère des Transports du Québec. Note technique : Survol méthodologique du modèle de transfert modal du MTQ*. Repéré à : <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1331060.pdf>
- Martin, R. (2021). *Émissions routières des polluants atmosphériques - Courbes et facteurs d'influence*. Cerema Nord-Picardie. Repéré à : <https://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/20326/emissions-routieres-des-polluants-atmospheriques-courbes-et-facteurs-d-influence>
- Mensing, F., Triui, R., Tattegrain, H. & Bideaux, E. (2014). *Eco-conduite des véhicules : du calcul de la trajectoire idéale à son utilisation lors de l'activité de la conduite*. Communication présentée au Symposium de Génie Electrique (SGE'14), Cachan, France. Repéré à : <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/AMPERE-H/hal-01065155v1>
- Ministère québécois de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (2022). *Ges 1990-2020 : Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2020 et leur évolution depuis 1990*. Repéré à : <https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/4602764>
- Ministère québécois de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (2024). « Les gaz à effet de serre » : <https://www.environnement.gouv.qc.ca/air/questce-ges.htm>
- Miotti, M., Needell, Z.A., Ramakrishnan, S., Heywood, J. & Trancik, J.E. (2021). Quantifying the impact of driving style changes on light-duty vehicle fuel consumption. *Transportation Research Part D-transport and Environment*, 98, 102918. Repéré à : <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:238690127>

- Morency, C., Demers, M. & Poliquin, E. (2014). Shifting short motorized trips to walking :The potential of active transportation for physical activity in Montreal. *Journal of Transport & Health*, 1. doi: 0.1016/j.jth.2014.03.002
- Morency, C., Verreault, H. & Frappier, A. (2020a). Estimating latent cycling and walking trips in Montréal. *International Journal of Sustainable Transportation*, 14(5), 349-360. <https://doi.org/10.1080/15568318.2018.1558467>
- Morency, P., Plante, C., Dubé, A.S., Goudreau, S., Morency, C., Bourbonnais, P.L., ... Smargiassi, A. (2020b). The Potential Impacts of Urban and Transit Planning Scenarios for 2031 on Car Use and Active Transportation in a Metropolitan Area. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(14), 5061. doi: 10.3390/ijerph17145061
- Netlift. <https://www.netlift.me/fr/>
- Nouri, P. (2016). *Enhancing the Gasoline Vehicles' CO₂ Emissions Estimation in Montreal*. (Thèse, Ecole Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada). Repéré à : https://publications.polymtl.ca/2038/1/2015_PegahNouri.pdf
- Paciornik, N., Rypdal, K., Eggleston, S., Goodwin, J., Irving, W., Penman, J. & Woodfield, M (2006). *Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre*. Repéré à : https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/french/pdf/1_Volume1/V1_1_Ch1_Introduction.pdf
- Perreault, M. (2009). *Émissions de gaz à effet de serre au Québec : évaluation de la performance de mesures permettant de réduire l'utilisation des véhicules de promenade*. (Mémoire, Université de Sherbrooke, Sherbooke, Canada). Repéré à : <https://core.ac.uk/download/pdf/51340187.pdf>
- Pineau, P.-O. & Vincent, B. (2023). *Tendances du parc Automobile québécois 2013-2021, préparé pour le Gouvernement du Québec*. Chaire de gestion du secteur de l'énergie, HEC Montréal. Repéré à : https://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2023/10/Rapport-ParcAutomobile_web.pdf
- Régie de l'énergie du Canada (2023). *Canada's Energy Future 2023*. Repéré à : <https://www.cer-rec.gc.ca/en/data-analysis/canada-energy-future/2023/canada-energy-futures-2023.pdf>
- Ressources naturelles Canada (2014). Le bon sens au volant. Repéré à : https://ressources-naturelles.canada.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/oeef/pdf/transportation/fuel-efficient-technologies/autosmart_factsheet_6_f.pdf

- Rolim, C., Baptista, P., Duarte, G. & Farias, T. (2014). Impacts of on-board devices and training on Light Duty Vehicle Driving Behavior. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 111, 711-720, doi: 10.1016/j.sbspro.2014.01.105
- Saoudi Hassani, O. (2015). *Mobilité des travailleurs et scénarios de gestion des déplacements faits en automobile*. (Mémoire, Ecole Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada). Repéré à : <https://publications.polymtl.ca/1762/>
- Sen, A., Miller, J., Hillman Alvarez, G. & Ferrini Rodrigues, P. (2023). *Vision 2050 strategies to align global road transport with well below 2°C*. International Council on Clean Transportation. Repéré à : <https://theicct.org/publication/vision-2050-strategies-to-reduce-gap-for-global-road-transport-nov23/>
- Shekarrizfard, M., Faghih-Imani, A., Tétreault, L.F., Yasmin, S., Reynaud, F., Morency, P., ... Hatzopoulou, M. (2017). Regional assessment of exposure to traffic-related air pollution : Impacts of individual mobility and transit investment scenarios. *Sustainable Cities and Society*, 29. doi: 10.1016/j.scs.2016.12.002
- Sicotte, G. (2014). *Modélisation de l'interdépendance entre modes de transport et chaînes de déplacements*. (Mémoire, Ecole Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada). Repéré à : <https://publications.polymtl.ca/1657/>
- Sider, T., Alam, A., Farrell, W., Hatzopoulou M. & Eluru, N. (2014). Evaluating vehicular emissions with an integrated mesoscopic and microscopic traffic simulation. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41. doi: 10.1139/cjce-2013-0536.
- Smargiassi, A., Plante, C., Morency, P., Hatzopoulou, M., Morency, C., Eluru, N., ... Requia, W. (2020). Environmental and health impacts of transportation and land use scenarios in 2061. *Environ Res*, 187, 109622. doi: 10.1016/j.envres.2020.109622.
- Stéphan, N. (2023). *Estimation des émissions de CO₂ à haute résolution spatiale et temporelle pour le transport routier de l'arrondissement montréalais de Saint-Laurent*. (Mémoire, ETS, Montréal, Canada). Repéré à : https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/3223/1/STEPHAN_Nolwen.pdf
- STM (2024). *Rapport de développement durable 2023 - Tableau complet des indicateurs*. Repéré à : <https://www.stm.info/sites/default/files/pdf/fr/indicateursdd2023.pdf>
- Ville de Montréal (2021). *Plan Climat 2020-2030*. Repéré à : <https://ghhin.org/wp-content/uploads/Plan-climat-2020-2030-Ville-de-Montreal-Etat-d'avancement-avril-2024.pdf>
- Tétreault, L.F., Eluru, N., Hatzopoulou, M., Morency, P., Plante, C., Morency, C., ... Smargiassi, A. (2018). Estimating the health benefits of planned public transit

investments in Montreal. *Environ Res*, 160, 412-419. doi: 10.1016/j.envres.2017.10.025.

Thomas, H. & Cabrera Serrenho, A. (2024). Using different transport modes: An opportunity to reduce UK passenger transport emissions ? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 126, 103989. doi: 10.1016/j.trd.2023.103989.

Tu, R., Kamel, I., Abdulhai, B. & Hatzopoulou, M. (2018). Reducing Transportation Greenhouse Gas Emissions Through the Development of Policies Targeting High-Emitting Trips. *Transportation Research Record*, 2672(25), 11-20. doi: [10.1177/0361198118755714](https://doi.org/10.1177/0361198118755714)

United Nations Environment Programme (2024). *Emissions Gap Report 2024: No more hot air ... please! With a massive gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments*. Nairobi. doi: 10.59117/20.500.11822/46404.

USEPA (2005). *MOVES2004 Energy and Emission Inputs Draft Report*. Repéré à : <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P1001DAQ.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2000+Thru+2005&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C00thru05%5CTxt%5C00000016%5CP1001DAQ.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL#>

USEPA (2015). *MOVES2014 and MOVES2014a Technical Guidance : Using MOVES to Prepare Emission Inventories for State Implementation Plans and Transportation Conformity*. Repéré à : <https://www.epa.gov/moves/previous-moves-versions-and-documentation>

USEPA (2023). *Fuel Supply Defaults Regional Fuels and the Fuel Wizard in MOVES4*. Repéré à : <https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-08/420r23025.pdf>

USEPA (2024). *Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories*. Repéré à : <https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-02/ghg-emission-factors-hub-2024.pdf>

USEPA (2024). *MOVES4 (Version 4.0.1) [Logiciel]*. Repéré à : <https://www.epa.gov/moves>

Verreault, H. & Morency, C. (2016). *Et si on valorisait les sièges vides ?* Communication présentée au 51e Congrès annuel de l'association québécoise des transports, Québec, Canada.

- Wang, Y., Welch, T.F., Wu, B., Ye, X. & Ducca, F.W. (2016). *Impact of Transit-oriented Development Policy Scenarios on Travel Demand Measures of Mode Share, Trip Distance and Highway Usage in Maryland*. Communication présentée au Transportation Research Board 93rd Annual Meeting, Washington, D.C., Etats-Unis. Repéré à : https://www.researchgate.net/publication/293683510_The_Impact_of_Transit-Oriented_Development_Scenarios_on_Transportation_in_Maryland
- Winkler, L., Pearce, D., Nelson, J. & Babacan, O. (2023). The effect of sustainable mobility transition policies on cumulative urban transport emissions and energy demand. *Nat Commun*, 14, 2357. doi: 10.1038/s41467-023-37728-x
- Zahabia, S.A.H., Miranda-Moreno, L., Patterson, Z., Barlac P. & Harding, C. (2012). Transportation Greenhouse Gas Emissions and its Relationship with Urban Form, Transit Accessibility and Emerging Green Technologies: A Montreal case study. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 54, 966-978, doi: 10.1016/j.sbspro.2012.09.812.