

Développement d'un inventaire du transport routier à haute
résolution spatio-temporelle pour la Carte Carbone de
Montréal : application à l'arrondissement de Saint-Laurent

par

Audrey ECK

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

M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 17 JUILLET 2025

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Audrey Eck, 2025



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

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

Mme. Catherine Morency, codirectrice
Département des génies civil, géologique et des mines à Polytechnique Montréal

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

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

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

LE 15 JUILLET 2025

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier ma directrice de recherche Annie Levasseur, ma co-directrice de recherche Catherine Morency, ainsi que Sandrine Quéré. Leurs conseils, supervision, écoute et bienveillance ont permis d'enrichir cette expérience de recherche et de la vivre sereinement.

Je souhaite également remercier toutes les personnes qui m'ont fourni un soutien technique, entre autres :

- Gang Cao, ingénieur à la Division de l'innovation et gestion des déplacements, Direction des projets d'aménagement urbain, Service de l'urbanisme et de la mobilité ;
- Jean-Philippe Desmarais, ingénieur et chef d'équipe à la Division de l'innovation et gestion des déplacements, Direction des projets d'aménagement urbains, Service de l'urbanisme et de la mobilité ;
- Anouk Germain-Paquette, ingénieure et coordonnatrice de la modélisation routière, Direction de la modélisation des systèmes de transport (DMST), Direction générale de la gestion des actifs routiers et de l'innovation (DGGARI), ministère des Transports et de la Mobilité durable ;
- Brigitte St-Pierre, ingénieure, directrice de la modélisation des systèmes de transport, ministère des Transports et de la Mobilité durable ;
- Régis Boucher, statisticien, chef d'équipe Secteur circulation, Direction générale du laboratoire des chaussées, ministère des Transports et de la Mobilité durable ;
- Jason Laframboise, conseiller en planification, arrondissement de Saint-Laurent.

Je tiens aussi à souligner l'appui financier reçu dans le cadre de ce projet. Cette recherche a été rendue possible grâce au soutien du Fonds de recherche du Québec - Nature et technologies (FRQNT), du ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie, et de la Chaire de recherche du Canada sur la mesure de l'impact des activités humaines sur les changements climatiques.

Je souhaite aussi remercier mes camarades du "labo", ainsi que mes proches pour leur soutien et leur écoute qui ont aussi contribué à l'avancée de cette recherche. Je remercie aussi les membres

du comité étudiant Tributerre et du club étudiant Réveil ÉTS, leur rencontre ayant assurément enrichi mon expérience pendant mon parcours académique.

Développement d'un inventaire du transport routier à haute résolution spatio-temporelle pour la Carte Carbone de Montréal : application à l'arrondissement de Saint-Laurent

Audrey ECK

RÉSUMÉ

Les villes nécessitent de disposer d'inventaires d'émissions de gaz à effet de serre (GES) pour suivre l'évolution de leurs émissions et de leurs cibles de réduction. Les inventaires existants pour la Ville de Montréal publiés annuellement fournissent une valeur annuelle unique des émissions sans résolution spatio-temporelle, ce qui limite l'identification des paramètres influençant les émissions. Le projet de Carte Carbone de la Chaire de recherche du Canada sur la mesure de l'impact des activités humaines sur les changements climatiques agit en ce sens en visant à inventorier les émissions de la Ville de Montréal à haute résolution spatio-temporelle pour tous les secteurs d'activité. Sous forme de carte numérique disponible en ligne, son objectif est de constituer un outil de sensibilisation pour la population et un outil d'aide à la décision. Le but de ce mémoire est de fournir une méthode pour quantifier les émissions de GES du transport routier à haute résolution spatio-temporelle pour la Carte Carbone. L'étude se concentre sur l'arrondissement de Saint-Laurent. La méthodologie repose sur la combinaison d'un modèle de circulation, de facteurs d'ajustement de la circulation, de la composition de la flotte de véhicules, des consommations de carburant et des facteurs d'émission. La méthode permet de quantifier les émissions de GES du transport routier à l'échelle des routes, et de connaître leur évolution sur une année avec une résolution temporelle horaire et journalière. L'analyse montre l'importance de développer des facteurs d'ajustement propres aux types de routes, aux types de véhicules et selon l'heure, le jour et le mois considérés. De futures recherches seront nécessaires pour inclure des paramètres comme la vitesse des véhicules dans le calcul des émissions.

Mots-clés: gaz à effet de serre, inventaire d'émissions, transport routier, résolution spatio-temporelle, Ville de Montréal

Development of a high-resolution spatial-temporal road transportation inventory for the Montréal Carbon Map : application to the borough of Saint-Laurent

Audrey ECK

ABSTRACT

Cities need greenhouse gas (GHG) emissions inventories to monitor the evolution of their emissions and progress toward reduction targets. Existing inventories for the City of Montréal, published annually, provide a single yearly emissions value without spatial-temporal resolution, limiting the identification of parameters that influence emissions. The Carbon Map project, led by the Canada Research Chair in Measuring the Impact of Human Activities on Climate Change, addresses this issue by aiming to inventory the City of Montréal's emissions at high spatial-temporal resolution across all activity sectors. Available online in the form of a digital map, its goal is to serve both as an awareness-raising tool for the public and a decision-support tool. The purpose of this master's thesis is to provide a method for quantifying road transport GHG emissions at a high spatial-temporal resolution for the Carbon Map. The study focuses on the borough of Saint-Laurent. The methodology combines a traffic model, traffic adjustment factors, vehicle fleet composition, fuel consumption data, and emission factors. This method makes it possible to quantify road transport GHG emissions at the road segment level and to track their evolution throughout the year with hourly and daily temporal resolution. The analysis highlights the importance of developing adjustment factors specific to road types, vehicle types, and time variables such as hour, day, and month. Further research is needed to include parameters such as vehicle speed in emission calculations.

Keywords: greenhouse gases, emissions inventory, road transport, spatio-temporal resolution, City of Montréal

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	3
1.1 Transport routier et changements climatiques	3
1.1.1 Changements climatiques	3
1.1.2 Impact du transport sur les changements climatiques	6
1.2 Inventaires de gaz à effet de serre territoriaux et objectifs de réduction	7
1.2.1 Échelle nationale	7
1.2.2 Échelle provinciale	8
1.2.3 Échelle municipale	10
1.2.4 Échelle de l'arrondissement de Saint-Laurent	13
1.3 Quantification des émissions de gaz à effet de serre du transport routier	15
1.3.1 Méthodes de calcul des inventaires territoriaux	15
1.3.1.1 Approche descendante	16
1.3.1.2 Approche ascendante	18
1.3.2 Estimation des émissions du transport routier à haute résolution spatiale et temporelle	20
1.3.2.1 Réduction d'échelle	20
1.3.2.2 Utilisation de relevés de circulation	24
1.3.2.3 Utilisation d'un modèle de simulation de la circulation	27
1.3.2.4 Utilisation de l'intelligence artificielle	30
1.4 Données de circulation pour Montréal	31
1.4.1 Modèle de circulation	32
1.4.1.1 Enquête Origine-Destination	32
1.4.1.2 Modélisation AIMSUN de l'arrondissement de Saint-Laurent	33
1.4.2 Données de comptage	37
1.4.2.1 Comptages aux intersections	37
1.4.2.2 Débits de circulation sur le réseau du MTMD	39
1.4.2.3 Tableau de bord des flux de circulation	40
1.4.3 Données télématiques	41
1.4.4 Données MTL Trajet	43
1.5 Données de modélisation des émissions du transport routier	44
1.5.1 Outil de consommation de carburant adapté au parc montréalais	44
1.5.1.1 Véhicules en circulation	45
1.5.1.2 Guides de consommation de carburant	45
1.5.2 Outil CURB	46
1.5.3 MOVES	46
1.6 Bilan et objectifs	48
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE	51

2.1	Estimation de la circulation à haute résolution spatiale et temporelle	53
2.1.1	Modèle de circulation AIMSUN de l'arrondissement de Saint-Laurent ...	53
2.1.2	Données de comptages	54
2.1.2.1	Sites	54
2.1.2.2	Facteurs d'ajustement	57
2.1.3	Extrapolation temporelle des débits	61
2.1.3.1	DJMA	61
2.1.3.2	Débits journaliers et horaires	62
2.1.3.3	Mode d'application des facteurs d'ajustement	63
2.1.4	Évaluation de l'estimation des débits	66
2.1.4.1	Évaluation des DJMA	68
2.1.4.2	Évaluation des débits horaires	69
2.1.5	Véhicules-kilomètres parcourus	72
2.2	Estimation des émissions de GES à haute résolution spatiale et temporelle	73
2.2.1	Parc de véhicules	76
2.2.2	Consommation de carburant	79
2.2.2.1	Véhicules légers	80
2.2.2.2	Camions et bus	82
2.2.3	Composition du carburant	83
2.2.4	Facteurs d'émission	84
2.2.5	Évaluation de l'estimation des émissions	85
CHAPITRE 3 RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS		87
3.1	Estimation de la circulation à haute résolution spatiale et temporelle	87
3.1.1	Facteurs d'ajustement	87
3.1.1.1	Facteurs horaires et tendances journalières	87
3.1.1.2	Facteurs mois-jours et tendances hebdomadaires et mensuelles	90
3.1.2	Évaluation des débits estimés	93
3.1.2.1	DJMA	93
3.1.2.2	Débits horaires	96
3.1.3	Circulation estimée	102
3.2	Estimation des émissions de GES à haute résolution spatiale et temporelle	104
3.2.1	Émissions journalières moyennes sur l'année	105
3.2.2	Émissions de GES journalières	109
3.2.3	Émissions de GES horaires	110
CHAPITRE 4 DISCUSSION		113
4.1	Méthode ascendante pour un inventaire à haute résolution spatio-temporelle	113
4.2	Limites et améliorations	114
4.2.1	Jeux de données utilisés	114
4.2.2	Extrapolation temporelle et évaluation des débits	115
4.2.3	Estimation et évaluation des émissions	117
4.3	Intégration à la Carte Carbone de Montréal	119

4.3.1	Mise à jour des données	119
4.3.2	Intégration des autres arrondissements	120
4.3.3	Combinaison avec la modélisation de scénarios de réduction	120
	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	123
ANNEXE I	DÉTAIL DU CONTENU DES JEUX DE DONNÉES RELATIFS AUX DÉBITS DE CIRCULATION DES ROUTES GÉRÉES PAR LE MTMD	127
ANNEXE II	SYNTHÈSE DES DONNÉES DE CIRCULATION DISPONIBLES À MONTRÉAL	129
ANNEXE III	CODES PYTHON	133
ANNEXE IV	COMPARAISON DES FLOTTES DE VÉHICULES	135
ANNEXE V	FACTEURS D'AJUSTEMENT ET EXEMPLES DE CALCUL DE DJMA	139
ANNEXE VI	COMPARAISON DES DÉBITS HORAIRES ESTIMÉS AVEC LES COMPTAGES AUX INTERSECTIONS	145
ANNEXE VII	DÉFINITIONS DES TYPES DE VÉHICULES SELON LES SOURCES DE DONNÉES	147
ANNEXE VIII	ESTIMATION DES ÉMISSIONS JOURNALIÈRES À PARTIR DE L'INVENTAIRE 2017 DE L'ARRONDISSEMENT DE SAINT- LAURENT	151
	LISTE DE RÉFÉRENCES	153

LISTE DES TABLEAUX

	Page	
Tableau 1.1	PRG sur un horizon de 100 ans issus de l'AR6 Adapté de IPCC (2023a, p. 1017)	5
Tableau 1.2	Émissions de GES du transport routier au Québec en 1990 et en 2022 Adapté de MELCCFP (2024b, p. 32)	10
Tableau 1.3	Classification des véhicules utilisée dans le jeu de données des <i>Comptages des véhicules, cyclistes et piétons aux intersections munies</i> <i>de feux de circulation</i> D'après les données de Miovision (2024)	39
Tableau 2.1	Sites permanents retenus pour le calcul des facteurs d'ajustement	56
Tableau 2.2	Plages de valeur des facteurs mois-jours	62
Tableau 2.3	Interprétation des valeurs de MAPE Tiré de Lewis (1982, p. 40)	68
Tableau 2.4	DJMA calculés par le MTMD et pris comme valeurs vraies D'après les données de Ministère des Transports et de la Mobilité durable (2024a)	69
Tableau 2.5	Association des sections de route du MTMD à celles du réseau routier AIMSUN	71
Tableau 2.6	Pourcentage des types de véhicules au sein de la matrice O-D "voiture"	74
Tableau 2.7	Association des types de véhicules AIMSUN à ceux des données de la SAAQ	78
Tableau 2.8	Pourcentages de véhicules avec le type de carburant c parmi les véhicules de type v D'après les données de SAAQ (2020) et STM (2014, p. 5)	79
Tableau 2.9	Consommations de carburant des véhicules légers retenues pour l'étude	81
Tableau 2.10	Consommations de carburant des camions et des bus retenues pour l'étude	83
Tableau 2.11	Facteurs d'émission retenus D'après les données de ECCC (2024b, p. 298)	85

Tableau 2.12	PRG utilisés dans l'inventaire 2017 de l'arrondissement de Saint-Laurent D'après les données de Boutin & Tacquet (2018, p. 13)	86
Tableau 3.1	Comparaison des DJMA estimés avec les DJMA des sites permanents du MTMD	94
Tableau 3.2	Comparaison des débits horaires estimés avec les débits horaires de 2013, 2015 et 2016 des sites permanents du MTMD	97
Tableau 3.3	Moyenne journalière des émissions par type de véhicule	105
Tableau 3.4	Comparaison entre la méthode développée et l'inventaire 2017 de Saint-Laurent	107

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1.1	Tendances des émissions de GES au Canada, par secteur du GIEC entre (1990-2022) Reproduite et adaptée avec l'autorisation de ECCC (2024a, p. 6)	8
Figure 1.2	Émissions de GES de la collectivité montréalaise en 2023 par secteur Reproduite et adaptée de BTER (2025, p. 3,4)	12
Figure 1.3	Répartition des émissions collectives de GES de l'Arrondissement de Saint-Laurent pour 2017 Reproduite et adaptée de Boutin & Tacquet (2018, p. 8)	14
Figure 1.4	Approche ascendante avec l'équation ASIF Reproduite et adaptée de Schipper et al. (2009, p. 14)	18
Figure 1.5	Emplacement des données de circulation dans l'arrondissement de Saint-Laurent et aux alentours	41
Figure 2.1	Méthodologie du mémoire	52
Figure 2.2	Exemple de différence de définition des sections de route entre le réseau routier du modèle AIMSUN et celui du MTMD	56
Figure 2.3	Sites de comptage retenus en fonction de leur utilisation et réseau routier du modèle AIMSUN	57
Figure 2.4	Extrait du réseau routier du modèle AIMSUN, des autoroutes de la géobase et de la jointure spatiale effectuée sur QGIS	64
Figure 2.5	Application des facteurs d'ajustement aux débits routiers	66
Figure 3.1	Profils de circulation horaires, tous les véhicules compris	88
Figure 3.2	Profils de circulation horaires à l'intersection Marcel-Laurin/Thimens selon le type de véhicule	90
Figure 3.3	Profils de circulation journaliers des jours de semaine sur 12 mois, tous les véhicules compris	91
Figure 3.4	Profils de circulation journaliers des jours de semaine sur 12 mois à l'intersection Marcel-Laurin/Thimens selon le type de véhicule	92

Figure 3.5	DJMA estimés (en bleu et en orange) et DJMA réels (barres noires) des tronçons routiers comparés	95
Figure 3.6	Débits horaires estimés en fonction des débits horaires réels des autoroutes de 2013 pour chaque section de route comparée	99
Figure 3.7	Écarts relatifs entre les débits horaires estimés et ceux réels des sites permanents du MTMD relevés en 2013	101
Figure 3.8	Débits horaires estimés et débits horaires des comptages aux intersections	102
Figure 3.9	DJMA estimés, tous types de véhicules compris	103
Figure 3.10	VKT estimés à partir des DJMA, tous types de véhicules compris	104
Figure 3.11	Densités d'émissions moyennes journalières par section de route	108
Figure 3.12	Sections de routes les plus émettrices en termes de densité d'émissions	109
Figure 3.13	Émissions journalières sur l'ensemble des sections de route sur les 7 jours de la semaine sur 12 mois en fonction du type de route	110
Figure 3.14	Émissions horaires d'un mercredi et d'un samedi de mai sur l'ensemble des sections de route pour tous les types de véhicules	111
Figure 3.15	Densités d'émission pour différentes heures d'un mercredi de mai	112

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ABM	<i>Agent Based Model</i>
AASHTO	<i>American Association of State Highway Transportation Officials</i>
AIMSUN	<i>Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and non-urban Networks</i>
ARTM	Autorité régionale de transport métropolitain
ASIF	<i>Activity-structure-intensity-fuel</i>
BDEE	Bulletin sur la disponibilité et l'écoulement d'énergie au Canada
BTER	Bureau de la transition écologique et de la résilience
CH ₄	Méthane
CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
CO	Monoxyde de carbone
CO ₂	Dioxyde de carbone
CURB	<i>Climate Action for Urban Sustainability</i>
DJMA	Débit journalier moyen annuel
DTA	<i>Dynamic Traffic Assignment</i>
DUE	<i>Dynamic User Equilibrium</i>
ECCC	Environnement et Changement climatique Canada
EDGAR	<i>Emissions Database for Global Atmospheric Research</i>
EIE	<i>Environmental Insights Explorer</i>
éq. CO ₂	équivalent CO ₂
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
GEH	Statistique Geoffrey E. Havers
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HBEFA	<i>Handbook Emission Factors for Road Transport</i>

IA	Intelligence artificielle
ICLEI	Gouvernements locaux pour le développement durable
LBS	<i>Location-based services</i>
LCRMC	Loi canadienne sur la responsabilité en matière de carboneutralité
LSCE	Laboratoire des Sciences du Climat et de L'Environnement
MAPE	<i>mean absolute percentage error</i>
MEIC	<i>Multi-resolution Emission Inventory</i>
MELCCFP	Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs
MOVES	<i>MOtor Vehicle Emission Simulator</i>
MTMD	Ministère des Transports et de la Mobilité durable
N ₂ O	Protoxyde d'azote
NDC	Contribution nationale déterminée
NMIM NCD	<i>National Mobile Inventory Model County Database</i>
NO _x	Oxyde d'azote
OMM	Organisation météorologique mondiale
O-D	Origine-Destination
PeMS	Performance measurement system
PHEM	<i>Passenger car and Heavy duty vehicle Emission Model</i>
PM	Matière particulaire
PBNV	Poids nominal brut du véhicule
PPC	Partenaires dans la Protection du Climat
PRG	Potentiel de réchauffement global
R ²	Coefficient de détermination
RIN	Rapport d'inventaire national
RMSNE	Erreur quadratique moyenne normalisée (<i>Root mean squared normalized error</i>)

RMSE	Écart quadratique moyen (<i>Root mean square error</i>)
RNCAN	Ressources naturelles Canada
SAAQ	Société de l'assurance automobile du Québec
SIG	Système d'information géographique
SRC	<i>Stochastic Route Choice</i>
STM	Société de transport de Montréal
SUM	Service de l'urbanisme et de la mobilité
TAK	Taux d'accumulation de kilométrage
UF	Facteur d'utilité (<i>Utility Factor</i>)
U.S. EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
VKT	Véhicules-kilomètres parcourus (<i>Vehicle Kilometers Traveled</i>)
VMT	<i>Vehicle Miles Traveled</i>
VSP	<i>Vehicle Specific Power</i>
VUS	Véhicule utilitaire sport
ZAT	Zones d'analyse des transports

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

g	gramme
g/km	gramme par kilomètre
g/L	gramme par litre
g/véhicule	gramme par véhicule
h	heure
j	jour
kg	kilogramme
km	kilomètre
km ²	kilomètre carré
km/L	kilomètre par litre
L	litre
L/100 km	litre pour 100 kilomètres
m	mètre
m ²	mètre carré
Mt	mégatonne
t	tonne
t éq. CO ₂	tonne équivalent CO ₂
t éq. CO ₂ /h	tonne équivalent CO ₂ par heure
t éq. CO ₂ /j	tonne équivalent CO ₂ par jour
t éq. CO ₂ /km/h	tonne équivalent CO ₂ par kilomètre par heure
t éq. CO ₂ /km/j	tonne équivalent CO ₂ par kilomètre par jour
véhicules-km	véhicule-kilomètre
véhicules-km/h	véhicule-kilomètre par heure
véhicules-km/j	véhicule-kilomètre par jour
W	watt

W/m² watt par mètre carré

°C degré celsius

INTRODUCTION

Le transport routier représente une source majeure d'émissions de gaz à effet de serre (GES) et contribue ainsi aux changements climatiques. Le transport est l'une des premières sources d'émissions de GES de la Ville de Montréal en représentant 45 % des émissions municipales en 2023, dont 69 % sont attribuables au transport routier (BTER, 2025). Dans un contexte de transition écologique, réduire les émissions de GES est crucial et nécessite de comprendre les sources d'émission pour élaborer des stratégies de réduction adéquates. La Ville de Montréal s'est engagée en 2020, dans son Plan Climat, à réduire ses émissions de 55 % par rapport à 1990 d'ici 2030 (Ville de Montréal, 2020). Les inventaires d'émissions de GES territoriaux constituent des outils de suivi de la trajectoire des émissions de GES vers les cibles définies. Les inventaires produits par la Ville de Montréal y contribuent en fournissant une valeur annuelle unique chaque année. Cependant, les résultats d'inventaires ne présentent ni de résolution spatiale ni de résolution temporelle, rendant difficile l'identification des paramètres influençant les émissions. La connaissance de la dynamique spatiale et temporelle des émissions contribuerait pourtant à la compréhension des sources d'émission et à l'orientation des politiques publiques.

Le projet de Carte Carbone, mené par la Chaire de recherche du Canada sur la mesure de l'impact des activités humaines sur les changements climatiques, consiste en la création d'une carte interactive et accessible en ligne des émissions de GES à haute résolution spatio-temporelle, tous secteurs confondus. Son objectif est de constituer un outil de sensibilisation pour la population et d'aide à la décision. La présente recherche s'inscrit dans le cadre de la Carte Carbone, en visant à développer une méthodologie pour quantifier avec une haute résolution spatio-temporelle les émissions de GES du transport routier. Afin de faciliter le développement méthodologique, l'étude se limite à l'arrondissement de Saint-Laurent.

Pour atteindre les objectifs de la recherche, un modèle de circulation de la circulation de l'arrondissement de Saint-Laurent, fourni par le Service de l'urbanisme et de la mobilité (SUM)

de la Ville de Montréal, est utilisé. Il représente la circulation à l'heure de pointe du matin et du soir pour une journée typique d'automne, et est combiné, dans un premier temps à des facteurs d'ajustement issus de comptages de la circulation. Cette combinaison permet d'obtenir des débits horaires à l'échelle des sections de route, et d'estimer le nombre de kilomètres parcourus par l'ensemble des véhicules, appelés aussi Véhicules-kilomètres parcourus ou *Vehicle Kilometers Traveled* (VKT). Les émissions de GES à haute résolution spatio-temporelle sont ensuite déduites en appliquant la consommation de carburant et les facteurs d'émission appropriés en fonction de la flotte de véhicules.

Le premier chapitre de ce mémoire présente une revue de littérature portant sur le transport et les changements climatiques, les méthodes existantes pour réaliser les inventaires territoriaux, ainsi que les données disponibles à Montréal en vue de réaliser un inventaire des émissions de GES à haute résolution spatio-temporelle pour le transport routier. Le deuxième chapitre aborde la méthodologie de la recherche. Les résultats obtenus sont présentés dans le troisième chapitre, avant d'être discutés dans le quatrième chapitre. Le mémoire se termine par une conclusion et des recommandations pour de prochaines recherches.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre introduit la responsabilité de l’activité du transport routier sur les changements climatiques, les approches utilisées pour quantifier les émissions GES du secteur, et justifie le développement d’une méthode d’estimation des émissions à haute résolution spatio-temporelle à l’échelle urbaine. Il présente également les données pertinentes disponibles pour la réalisation de cette étude, avant d’énoncer les objectifs de celle-ci.

1.1 Transport routier et changements climatiques

Représentant le deuxième poste de dépenses chez les ménages québécois, le transport est intégré dans notre quotidien, que ce soit pour se rendre au travail, faire ses courses ou se déplacer vers des lieux de loisirs (Institut de la statistique du Québec, 2024). Cette mobilité n’est pas sans conséquence, étant une source majeure d’émissions de polluants atmosphériques, dont des GES qui causent les changements climatiques (MELCCFP, 2024d).

1.1.1 Changements climatiques

Les changements climatiques sont définis selon l’article premier de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) comme les variations du climat causées par l’altération de la composition atmosphérique due aux activités humaines et qui s’ajoute à la variabilité naturelle du climat (Nations Unies, 1992). Le climat désigne les conditions météorologiques sur une longue période et pour une région donnée, la période type utilisée par l’Organisation météorologique mondiale (OMM) étant de 30 ans. Il se caractérise par la mesure statistique de grandeurs telles que la température, les précipitations et le vent (Organisation météorologique mondiale, 2024; IPCC, 2023b).

De manière non équivoque, le climat s’est réchauffé durant les dernières décennies, et ce, en raison des émissions de GES générées par les activités humaines (IPCC, 2023b). L’année 2024 est l’année la plus chaude enregistrée depuis 1850 et également la première année où la température

moyenne mondiale surpassé de plus de 1,5 °C le niveau préindustriel de 1850-1900 (Copernicus, 2025). Les émissions de GES anthropiques affectent les composantes du système terrestre en réchauffant notamment l'atmosphère et les océans, mais causent également l'acidification des océans. La perturbation du système climatique intensifie et augmente la fréquence des événements climatiques extrêmes comme les vagues de chaleur, les fortes précipitations, les cyclones ou encore les sécheresses. Ces répercussions sont déjà visibles et touchent chaque région du monde. Les changements climatiques ont donc des conséquences sur des vies humaines, et particulièrement sur les populations les plus vulnérables (IPCC, 2023b).

Les GES sont des gaz naturellement présents dans l'atmosphère qui contribuent au mécanisme d'effet de serre en absorbant et en réémettant vers la couche inférieure de l'atmosphère les radiations infrarouges émises par la Terre vers l'espace. Ce phénomène naturel permet de créer des conditions favorables à la vie sur Terre en élevant la moyenne des températures à 15 °C, au lieu de -16 °C si les GES n'étaient pas présents. Cependant, l'augmentation de la concentration en GES crée un forçage radiatif¹ positif, entraînant un climat plus chaud. La vapeur d'eau et le dioxyde de carbone (CO₂) sont les GES les plus abondants. Les GES comprennent également le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O). Les différents GES n'ayant pas tous la même capacité d'absorption et la même durée de vie dans l'atmosphère, les émissions de GES sont souvent rapportées en équivalent CO₂, noté éq. CO₂. Cet indicateur représente, pour une certaine quantité d'un ou de plusieurs GES et sur un certain horizon temporel, la quantité de CO₂ qui serait émise en provoquant le même forçage radiatif. Pour obtenir une émission en éq. CO₂, l'émission d'un GES donné est multipliée par son potentiel de réchauffement global PRG pour l'horizon temporel considéré, qui est généralement de 100 ans (IPCC, 2023b). Les PRG du CO₂, CH₄ et du N₂O fournis dans le sixième rapport d'évaluation (AR6), le dernier rapport du GIEC à ce jour, sont donnés dans le tableau 1.1 (IPCC, 2023a). Pour le méthane, deux valeurs de PRG sont données : l'une "fossile", qui inclut le forçage radiatif causé par la formation de CO₂ suite à l'oxydation du méthane qui survient à la fin de la durée de vie atmosphérique d'une

¹ Mesuré en watts par mètre carré (W/m²), le forçage radiatif désigne la variation de l'équilibre énergétique du système terrestre dû à un perturbateur externe. Un forçage positif signifie qu'un excès d'énergie reste dans le système, ce qui réchauffe le climat, tandis qu'un forçage négatif indique qu'il y a plus d'énergie qui quitte le système, ce qui refroidit le climat (Bush & Lemmen, 2019).

molécule de méthane, et l'autre intitulée "non-fossile" qui n'inclut pas cet effet. La valeur du PRG "méthane - fossile" est à utiliser dans le cas des sources d'émissions fugitives de combustibles fossiles (fuites dans les systèmes pétroliers et gaziers par exemple), et des procédés industriels pour lesquels le carbone contenu dans le méthane est d'origine fossile (production d'éthylène ou de carbure par exemple). À l'inverse, pour toutes les autres sources d'émissions, y compris la combustion, la valeur du PRG "méthane - non fossile" est à appliquer. En effet, le CO₂ causé par l'oxydation du méthane est généralement déjà compté dans les émissions de CO₂ générées par la combustion (Greenhouse Gas Protocol, 2024).

Tableau 1.1 PRG sur un horizon de 100 ans issus de l'AR6
Adapté de IPCC (2023a, p. 1017)

Gaz à effet de serre	Formule chimique	PRG (horizon de 100 ans)
Dioxyde de carbone	CO ₂	1
Méthane - non-fossile	CH ₄	27,0
Méthane - fossile	CH ₄	29,8
Protoxyde d'azote	N ₂ O	273

La combustion de combustibles fossiles, la déforestation et l'utilisation de certains procédés industriels comme la production de ciment sont les principales sources de CO₂ issues des activités humaines. L'utilisation de carburants fossiles est également l'une des principales sources anthropiques du CH₄, en plus de l'élevage du bétail, de la culture du riz, des sites d'enfouissement, de la combustion de la biomasse ou encore de l'extraction et de la distribution du gaz naturel. Les émissions de N₂O sont principalement dues à l'utilisation d'engrais azotés, à l'élevage et à la combustion de combustibles fossiles et de la biomasse (Bush & Lemmen, 2019; MELCCFP, 2024b).

Depuis la CCNUCC entrée en vigueur en 1994, plusieurs traités mondiaux ont été signés pour enrayer les changements climatiques et leurs effets, comme le Protocole de Kyoto en 1997

et l'Accord de Paris en 2015. Ce dernier fixe l'objectif de maintenir la température moyenne mondiale en dessous de +2 °C par rapport aux niveaux préindustriels tout en poursuivant les efforts pour limiter l'augmentation à +1,5 °C (IPCC, 2023b; Nations Unies, 2015).

1.1.2 Impact du transport sur les changements climatiques

Avec la combustion de carburants, le transport routier émet comme GES en grande partie du CO₂, et dans une moindre mesure du N₂O et du CH₄ (Lapuerta, Rodríguez-Fernández & Herreros, 2017; GIEC, 2006a). Dans les *Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre*, la catégorie du transport routier englobe "tous les types de véhicules utilitaires légers tels que les automobiles et les camions légers, les véhicules utilitaires lourds tels que les tracteurs semi-remorques et les bus, et les motocycles sur route" (GIEC, 2006a).

D'autres polluants sont également émis lors de la combustion de carburants, comme des particules fines, du monoxyde de carbone (CO) ou des oxydes d'azote (NO_x) qui dégradent notamment la qualité de l'air affectant la santé humaine. Cependant, les changements climatiques étant la principale préoccupation de cette recherche, ces substances ne seront pas abordées.

En 2022 au Québec, le secteur des transports est la principale source d'émissions en générant 34,3 Mt éq. CO₂, soit 43,3 % des émissions provinciales. Le transport routier occupait la plus grande partie de ces émissions en y contribuant à hauteur de 74,6 %. De plus, la tendance est à la hausse puisque les émissions du transport ont augmenté de 25,6 % par rapport à 1990 alors que la plupart des autres secteurs voient leurs émissions diminuer (MELCCFP, 2024b).

Le secteur du transport, et en particulier celui du transport routier, joue ainsi un rôle clé dans les émissions de gaz à effet de serre du Québec. L'aspect mobile du transport peut en complexifier le calcul des émissions et leur allocation aux villes, mais leur quantification est nécessaire afin d'identifier les principales sources pour en réduire les émissions (Fong *et al.*, 2021). Réaliser des inventaires d'émissions de GES permet également de s'assurer de respecter les objectifs en matière de réduction.

1.2 Inventaires de gaz à effet de serre territoriaux et objectifs de réduction

Avec l'Accord de Paris, les États doivent soumettre des plans appelés contributions nationales déterminées (NDC), dont les cibles varient en fonction de leurs capacités. Les pays développés comme le Canada ont ainsi dû délivrer un plan pour contribuer de manière plus ambitieuse à la réduction des émissions. Ces contributions nationales doivent être révisées à la hausse tous les cinq ans (Nations Unies, 2015; CCNUCC, 2024). Rapporter les émissions de GES est donc nécessaire pour assurer une transparence et un suivi de l'atteinte des objectifs. Les inventaires et plans d'action peuvent se décliner sous différentes échelles territoriales.

1.2.1 Échelle nationale

Dans le cadre de l'Accord de Paris qui impose aux États de fournir régulièrement un rapport national d'inventaire des émissions anthropiques, le Canada présente chaque année son rapport d'inventaire national (RIN). Celui-ci suit les Lignes directrices 2006 du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) pour établir les méthodes d'estimation à employer (GIEC, 2006b; Nations Unies, 2015; ECCC, 2024a).

Depuis 1990, les émissions de GES nationales ont tendance à augmenter malgré quelques fluctuations (figure 1.1). En 2022, les émissions de GES du Canada s'élevaient à 708 Mt éq. CO₂. En représentant 1,5 % des émissions mondiales en 2020, le Canada est le 11^e plus grand émetteur mondial. En matière d'émissions par habitant, le Canada se trouve également dans les premières positions mondiales avec 18 t d'éq. CO₂/habitant. Les plus récents engagements pris par le Canada visent la réduction des émissions de 40 à 45 % d'ici 2030 par rapport à 2005 et l'atteinte de la carboneutralité d'ici 2050, conformément à la contribution nationale révisée de 2021 et la *Loi canadienne sur la responsabilité en matière de carboneutralité* (LCRMC) (ECCC, 2024a). Avec la publication en 2022 du Plan de réduction des émissions pour 2030, le Canada fixe un objectif provisoire en 2026 de 20 % en dessous des niveaux de 2005 (ECCC, 2022).

Le secteur des transports représente presque 28 % des émissions nationales, en grande partie en raison du transport routier qui contribue à hauteur de 61 % des émissions du secteur. Le

transport routier, qui dans le RIN inclut le transport en véhicules légers, en camions légers² et les véhicules lourds au diesel, a vu ses émissions croître de 31 % entre 1990 et 2022. Cette augmentation est notamment due à la hausse de la circulation qui comprend le nombre de kilomètres parcourus par véhicule, ainsi que le parc automobile, parc automobile qui a augmenté de 50 % entre 1990 et 2022. Depuis 2005, les camions légers sont les principaux contributeurs aux émissions du transport en raison de la hausse de leurs ventes malgré une amélioration du rendement énergétique moyen. En 2022, ils représentaient 27 % des émissions du secteur (ECCC, 2024a).

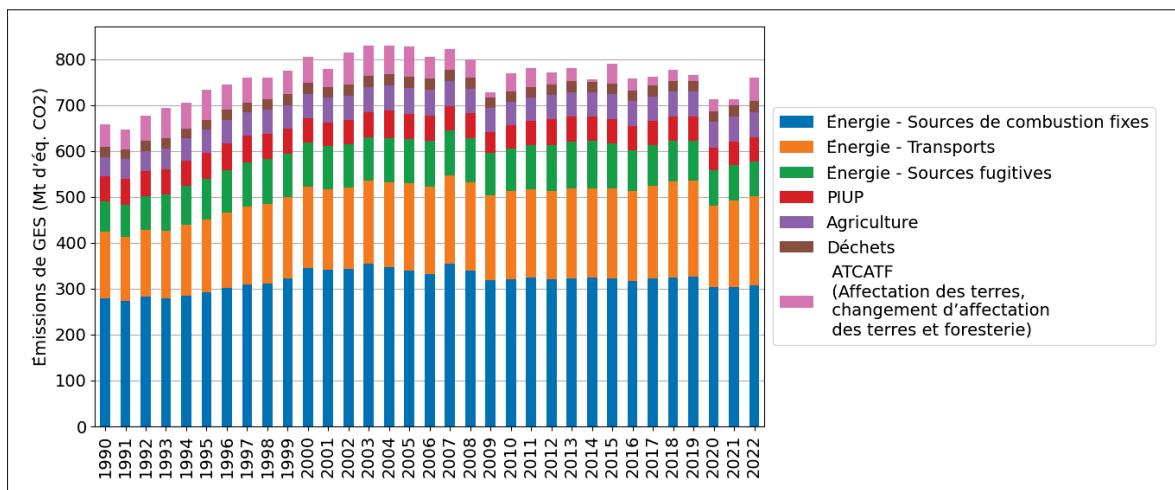


Figure 1.1 Tendances des émissions de GES au Canada, par secteur du GIEC entre (1990-2022)

Reproduite et adaptée avec l'autorisation de ECCC (2024a, p. 6)

1.2.2 Échelle provinciale

Le Québec a également adopté des cibles de réduction de ses émissions de GES. La province planifie de les réduire de 37,5 % d'ici 2030 par rapport à 1990 tout en ayant l'objectif d'atteindre la carboneutralité d'ici 2050 (MELCCFP, 2024c).

² Les camions légers comprennent les véhicules utilitaires sport (VUS), les fourgonnettes et certaines camionnettes.

Le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) publie annuellement depuis 1990 un inventaire des émissions de GES anthropiques générées au Québec (MELCCFP, 2024b). Le calcul des émissions se base sur les lignes directrices du GIEC. Pour la catégorie des transports, les émissions de GES du Québec sont compilées et fournies par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) (MELCCFP, 2024a).

En 2022, les émissions totales de GES du Québec étaient de 79,3 Mt éq. CO₂, soit 11,2 % des émissions canadiennes. Comme dit dans la section 1.1.2, le transport est le principal émetteur d'émissions de la province en contribuant aux émissions provinciales à hauteur de 43,3 %, dont 74,6 % sont attribuables au transport routier. En raison de l'absence d'exploitation pétrolière au Québec et de l'électricité fortement décarbonée de la province, on constate que la contribution du transport (en %) dans les émissions québécoises est plus élevée que sa contribution dans les émissions canadiennes. Entre 1990 et 2022, les émissions du transport routier ont augmenté de 23,2 %. La hausse du nombre de camions légers et de véhicules lourds³ sur les routes (345 % et 72 % respectivement entre 1990 et 2022), et l'augmentation de 82 % de la distance parcourue par les véhicules lourds expliquent l'accroissement des émissions sur cette période. Comme le montre le tableau 1.2, les émissions des camions légers et des véhicules lourds ont augmenté de 150,5 % et 80,9 % respectivement. En revanche, les émissions des automobiles ont diminué de 43,4 % sur la même période, en raison de la diminution du nombre d'automobiles et du renouvellement du parc (MELCCFP, 2024b).

³ Les véhicules lourds comprennent les autobus, camions et tracteurs routiers.

Tableau 1.2 Émissions de GES du transport routier au Québec en 1990 et en 2022
 Adapté de MELCCFP (2024b, p. 32)

Transport routier	Émissions (Mt éq. CO₂)		Variation des émissions de 1990 à 2022		Part du secteur en 2022
	1990	2022	Mt éq. CO₂	%	
Automobiles	12,16	6,88	-5,27	-43,4	26,9
Camions légers	4,34	10,87	6,53	150,5	42,5
Véhicules lourds	4,18	7,56	3,38	80,9	29,6
Autres (motocyclettes, véhicules au propane et au gaz naturel)	0,08	0,27	0,18	221,7	1,0
Total	20,76	25,58	4,83	23,2	100,0

1.2.3 Échelle municipale

En 2020, la Ville de Montréal publie le Plan Climat 2020-2030 dans lequel elle s'engage à réduire d'ici 2030 les émissions de GES de la collectivité montréalaise de 55 % par rapport au niveau de 1990, pour atteindre la carboneutralité en 2050 (Ville de Montréal, 2020).

Ces engagements nécessitent de suivre l'évolution des émissions de GES de la collectivité montréalaise, ce que la Ville de Montréal réalise chaque année en publiant un inventaire des émissions de la collectivité. Depuis 2013, le *Global protocol for community-scale Greenhouse gas inventories* (GPC) du *World Resources Institute*, du C40 *Cities Climate Leadership Group* (C40) et des Gouvernements locaux pour le développement durable (ICLEI) sert de cadre de référence pour réaliser ces inventaires (BTER, 2024b; Fong & Doust, 2014). Pour évaluer les

émissions du transport routier, la méthodologie employée a récemment évolué⁴, les émissions du transport routier provenant désormais de l'outil *Environmental Insights Explorer* (EIE) de Google (BTER, 2024b). Avant ce changement, le calcul des émissions du transport routier se basait sur la vente de carburant (Division de la planification et du suivi environnemental Service de l'environnement, 2016; Stéphan, 2022).

En 2023, les émissions totales de GES de la Ville de Montréal étaient de 11 500 kt éq. CO₂, représentant une augmentation de 9 % par rapport à 2022. Comme pour le Québec, le secteur du transport est un poste d'émissions majeur en représentant 45 % des émissions montréalaises, avec le transport routier comme grand contributeur en participant à 69 % des émissions du transport (figure 1.2). Entre 2022 et 2023, les émissions du transport routier ont augmenté de 4 %, hausse expliquée en grande partie par l'accroissement de l'utilisation des véhicules (BTER, 2025). Dans l'inventaire de 2022 où le même constat d'augmentation des émissions du transport routier par rapport à l'année précédente est observé, le Bureau de la transition écologique et de la résilience (BTER) mentionne en outre que la tendance d'augmentation du poids des véhicules et du parc automobile explique également l'accroissement des émissions (BTER, 2024a). D'après les données de la Société de l'assurance automobile du Québec (SAAQ), le nombre de véhicules en circulation dans la région administrative de Montréal a augmenté de presque 10 % entre 2013 et 2022 (SAAQ, 2023b).

Par rapport aux niveaux de 1990, année de référence des objectifs de la Ville de Montréal, les émissions totales de la Ville de Montréal ont baissé de 24 % en 2023. Malgré cette diminution, les émissions du transport sont à la hausse en ayant augmenté de 17 % par rapport à 1990. Le BTER précise que pour atteindre l'objectif de réduction de 55 % d'ici 2030 par rapport à 1990, les émissions montréalaises devront diminuer de 40,9 % sur les prochaines années par rapport à 2023 (BTER, 2025).

⁴ Malheureusement, les inventaires annuels et les méthodologies associées ne restent pas publiés en permanence sur le site de la Ville de Montréal, ne permettant pas de déterminer avec certitude l'année du changement de méthode.

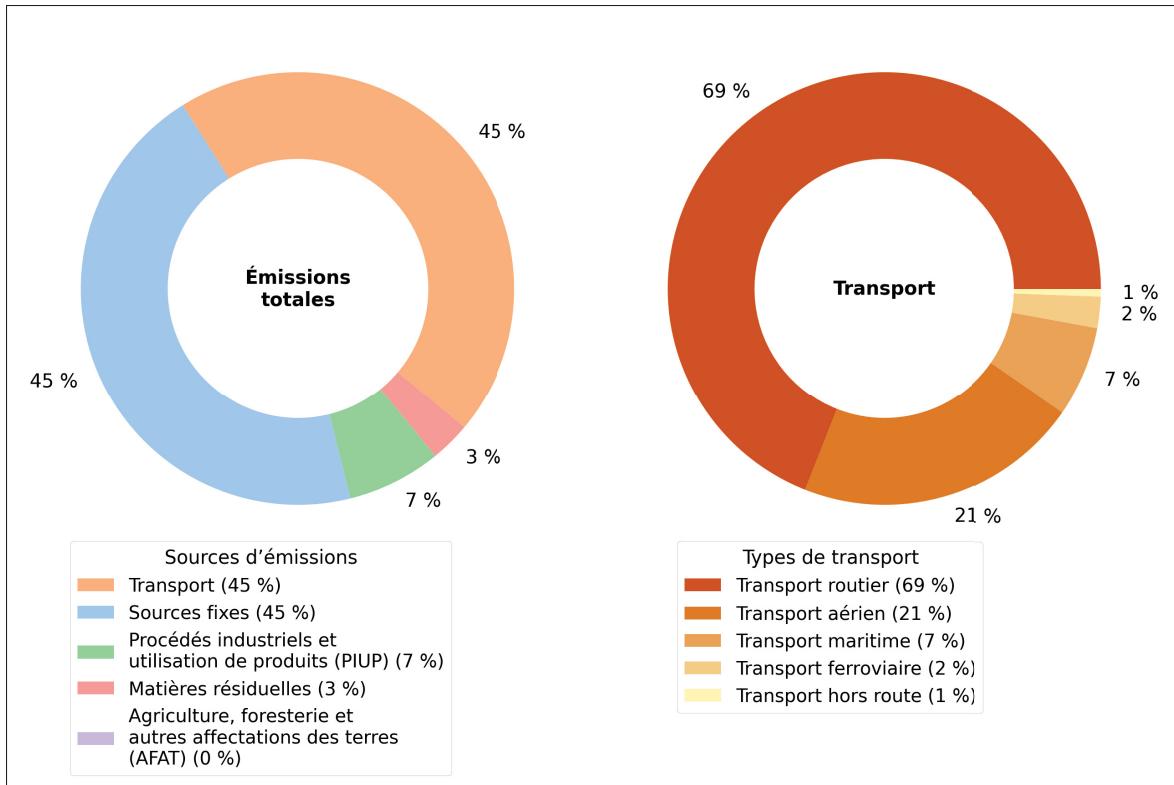


Figure 1.2 Émissions de GES de la collectivité montréalaise en 2023 par secteur
Reproduite et adaptée de BTER (2025, p. 3,4)

1.2.4 Échelle de l'arrondissement de Saint-Laurent

Comme la Ville de Montréal, l'arrondissement de Saint-Laurent s'est également doté de cibles de réduction de ses émissions de GES et s'aligne avec les objectifs de la ville en visant une réduction de 55 % de ses émissions collectives d'ici 2030 par rapport à 1990 (Arrondissement de Saint-Laurent, 2023). Les émissions collectives regroupent les émissions générées par la communauté laurentienne, y compris les activités municipales (Boutin & Tacquet, 2018).

Dans le cadre de la dernière étape du programme des *Partenaires dans la Protection du Climat* (PPC) dans lequel l'arrondissement de Saint-Laurent s'est engagé en 2013, l'arrondissement a fourni son inventaire de GES pour l'année 2017. En plus de respecter les exigences du PPC, l'inventaire de 2017 suit également les directives du GPC et les principes de la norme ISO 14064-1 : 2006 (*Spécifications et lignes directrices, au niveau des organismes, pour la quantification et la déclaration des émissions et des suppressions des gaz à effet de serre*). Pour calculer les émissions du transport, les émissions de la province de Québec ont été rapportées à l'arrondissement de Saint-Laurent en utilisant le nombre de véhicules immatriculés sur le territoire de l'arrondissement (Boutin & Tacquet, 2018).

Entre 2009 et 2017, les émissions de GES collectives ont baissé de 15 %, passant de 689 011 t éq. CO₂ à 583 687 t éq. CO₂. Le transport est le principal poste d'émissions, en représentant 41 % des émissions totales (cf. figure 1.3). En représentant 227 830 t éq. CO₂, soit 39 % des émissions totales, le transport routier est le type de transport qui a produit le plus d'émissions en 2017 (Boutin & Tacquet, 2018).

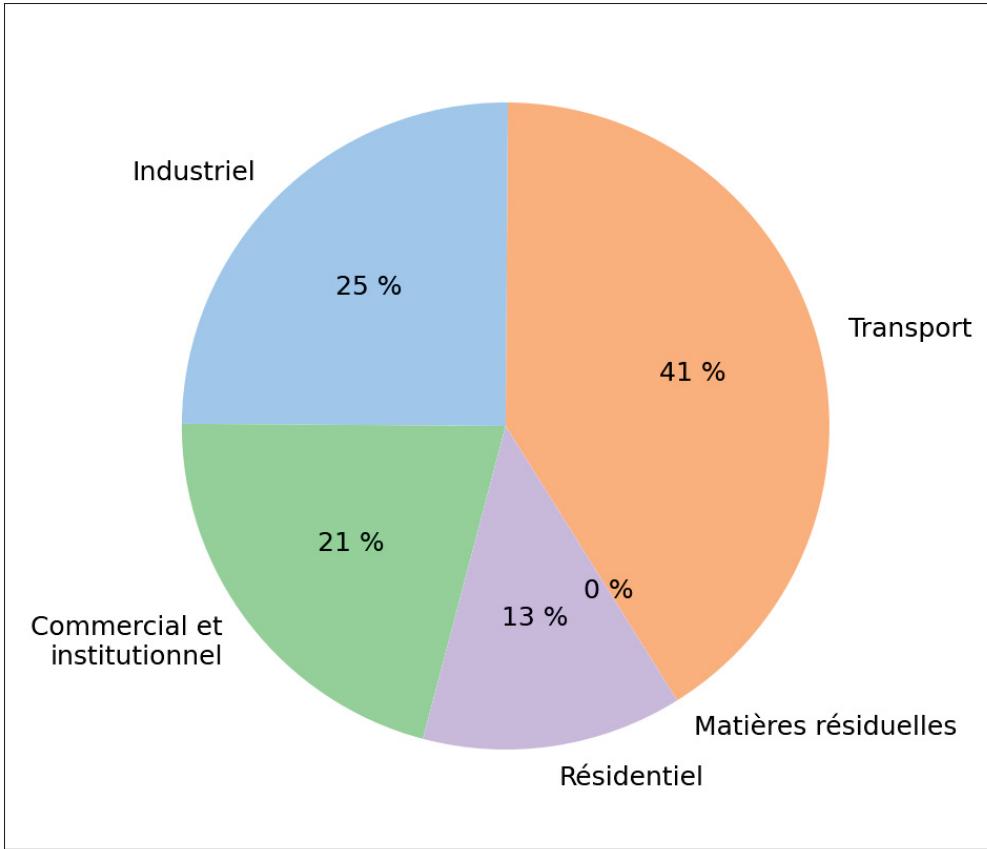


Figure 1.3 Répartition des émissions collectives de GES de l'Arrondissement de Saint-Laurent pour 2017
Reproduite et adaptée de Boutin & Tacquet (2018, p. 8)

Quelle que soit l'échelle territoriale, le transport est l'un des secteurs les plus contributeurs aux émissions, avec le transport routier comme chef de file et dont les émissions ont tendance à s'accroître depuis 1990. L'augmentation de l'utilisation des véhicules, du parc automobile et du poids des véhicules (phénomène de "camionisation") explique cette augmentation.

Les inventaires présentés ici permettent d'obtenir une valeur des émissions annuelles, sans résolution spatio-temporelle. Pour réduire les émissions, des actions locales nécessitent d'être mises en place, impliquant le besoin de réaliser des inventaires avec une plus fine résolution et à l'échelle urbaine. De plus, la circulation étant variable selon le moment de la journée et spatialement, élaborer des inventaires qui font correspondre la résolution spatio-temporelle des

émissions de GES avec l'échelle à laquelle celles-ci sont générées (à l'échelle des véhicules sur une base horaire par exemple dans le cas du transport routier) permet non seulement de mieux identifier les sources d'émissions, mais également de fournir aux municipalités et aux citoyens un outil adéquat pour concevoir et suivre les politiques de réduction qui sont élaborées pour des échelles locales (Gurney *et al.*, 2015; Gately & Hutyra, 2017; Ciais *et al.*, 2014; Mateo Pla *et al.*, 2021).

1.3 Quantification des émissions de gaz à effet de serre du transport routier

Pour élaborer des inventaires consistants et robustes, les villes et autres territoires peuvent s'appuyer sur des lignes directrices. Parmi celles-ci, celles du GPC permettent de constituer des inventaires de manière standardisée (GIEC, 2006b; Fong *et al.*, 2021).

1.3.1 Méthodes de calcul des inventaires territoriaux

Le GPC aide les territoires à évaluer et suivre les émissions de GES de manière consistante et transparente en fournissant des recommandations sur les sources d'émission à considérer, leur catégorisation, les GES à inclure et les frontières des inventaires. D'après le GPC, pour la plupart des sources, les émissions de GES sont calculées en multipliant des données d'activité à un facteur d'émission associé aux données d'activité, selon l'équation 1.1. Les données d'activité correspondent à une valeur quantitative associée à un niveau d'activité qui génère des émissions de GES. Dans le cas du transport, les données d'activité peuvent par exemple être une quantité de carburant consommée ou le nombre de kilomètres parcourus. Les facteurs d'émission représentent la quantité de GES émise pour une unité de l'activité considérée (Fong *et al.*, 2021; Stéphan, 2022).

$$\text{Émissions de GES} = \text{Données d'activité} \times \text{Facteur d'émission} \quad (1.1)$$

Les émissions sont classifiées dans trois catégories appelées "scope" selon le lieu où elles sont produites. Le scope 1 correspond aux émissions générées à l'intérieur des frontières géographiques du territoire considéré. Le scope 2 se rapporte aux émissions générées en dehors du territoire par la production d'électricité, de chaleur ou de vapeur induites par des activités ayant lieu dans le territoire. Le scope 3 réfère aux émissions indirectes ayant lieu en dehors du territoire (autres que les émissions de la production d'électricité, de chaleur ou de vapeur) en conséquence des activités ayant lieu à l'intérieur du territoire étudié. Pour le transport, cela se traduit ainsi : les émissions du scope 1 se réfèrent aux émissions de GES du transport des particuliers et du transport commercial générées à l'intérieur du territoire étudié, le scope 2 aux émissions dues à la production d'électricité nécessaire pour alimenter les véhicules électriques rechargés à l'intérieur du territoire, tandis que le scope 3 inclut les émissions de la partie hors du territoire des déplacements qui commencent ou se terminent dans la zone d'étude (Fong *et al.*, 2021).

Dans le GPC, le secteur du transport routier comprend les véhicules circulant sur la route et qui transportent des personnes, des biens ou du matériel. Les véhicules englobés dans le transport routier sont ainsi les voitures, camions, motos, bus et les véhicules de collecte des déchets. Le GPC propose plusieurs méthodes communes pour quantifier et allouer les émissions du transport, qui sont catégorisées en deux types d'approche : l'approche descendante (ou *top-down* en anglais) et l'approche ascendante (ou *bottom-up*) (Fong *et al.*, 2021). Le choix de l'approche dépend du niveau de détail des données et de leur disponibilité (Mateo Pla *et al.*, 2021).

1.3.1.1 Approche descendante

Dans le cas de l'approche descendante, les émissions sont calculées sur la base de données à grande échelle, comme le carburant vendu utilisé alors comme donnée d'activité qui est ensuite multiplié par un facteur d'émission associé à chaque type de carburant. Lorsque l'échelle de ce type de données ne correspond pas à la zone d'étude, celles-ci sont mises à l'échelle en utilisant des proxys comme la population ou le nombre de véhicules immatriculés (Fong *et al.*, 2021).

La méthode des ventes de carburant, que la Ville de Montréal utilisait dans ses précédents inventaires avant de récemment changer de méthode, est ainsi une méthode dite descendante. Quelques évolutions ont eu lieu au fur et à mesure des années, mais en 2013 les ventes de carburant à l'échelle de l'agglomération de Montréal étaient ajustées en multipliant par le prorata du nombre d'immatriculations par type de véhicule, pour être multipliées ensuite par des facteurs d'émission par type de véhicule pour calculer les émissions de GES (Division de la planification et du suivi environnemental Service de l'environnement, 2016).

Le principal avantage de la méthode des ventes de carburant est qu'elle est moins coûteuse et chronophage que des méthodes dites ascendantes, et est donc plutôt accessible. Cependant, il se peut que des trajets ayant lieu sur le territoire étudié soient effectués avec du carburant acheté à l'extérieur. Cette approche ne permet donc pas de prendre en compte ce type de déplacement, ou à l'inverse, elle inclut des déplacements ayant lieu à l'extérieur de la zone d'étude avec du carburant acheté à l'intérieur. De plus, utiliser un ratio des véhicules immatriculés suppose des habitudes uniformes sur le territoire de la part des conducteurs. Par exemple, parmi ces habitudes figurent les types de véhicules empruntés et la distance parcourue, qui influencent les émissions générées et qui varient spatialement.

L'approche descendante est ainsi plutôt adaptée pour quantifier les émissions pour des grands territoires, c'est-à-dire à l'échelle nationale ou provinciale, car ils englobent la plupart des déplacements. En revanche, les émissions à une échelle locale, par exemple municipale, présentent plus d'erreurs en raison des déplacements entrants et sortants plus nombreux et du processus de désagrégation spatiale à l'aide de proxys. Ce type d'approche présente également l'inconvénient de ne pas permettre d'identifier les paramètres influençant les émissions liées aux déplacements ni de démontrer les potentiels de réduction (Fong *et al.*, 2021; Gurney *et al.*, 2019a; Mateo Pla *et al.*, 2021).

1.3.1.2 Approche ascendante

L'approche ascendante se base sur des données d'activité détaillées pour calculer les émissions de GES et repose généralement sur le cadre ASIF (*activity-structure-intensity-fuel*), comme illustré sur la figure 1.4. L'activité totale en transport est souvent exprimée avec les VKT en véhicules-km. Cette grandeur représente le nombre de kilomètres parcourus par l'ensemble des véhicules, autrement dit le nombre et la distance des déplacements. Elle est aussi parfois appelée VMT pour *Vehicle Miles Traveled* lorsque les miles correspondent à l'unité de longueur. Les modèles de transport peuvent également contribuer au calcul des émissions avec une approche ascendante (Fong *et al.*, 2021; Schipper, Herbert & Leather, 2009).

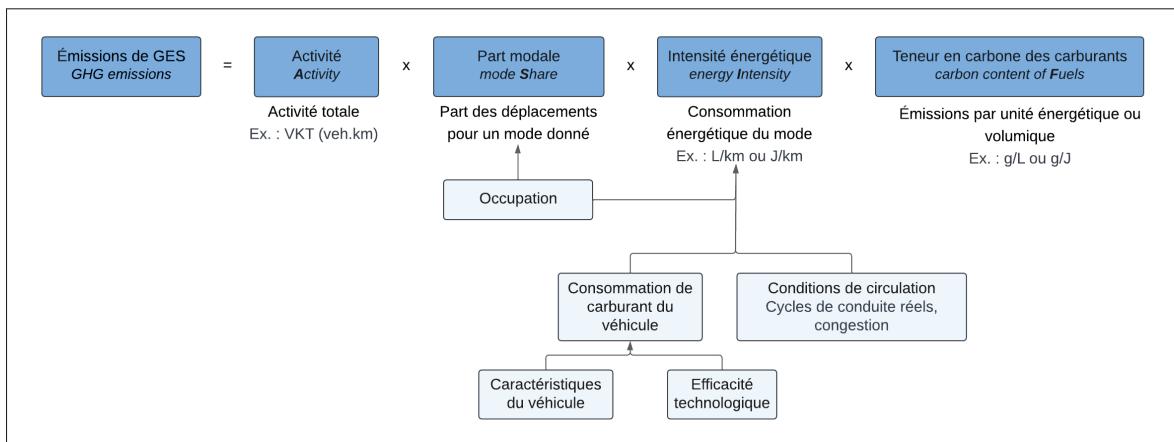


Figure 1.4 Approche ascendante avec l'équation ASIF
Reproduite et adaptée de Schipper et al. (2009, p. 14)

Les méthodes des inventaires nationaux et de la Ville de Montréal ont subi quelques changements au fur et à mesure des années. Les derniers inventaires publiés reposent sur une approche ascendante.

Pour réaliser l'inventaire national des émissions du transport routier, les émissions provinciales et territoriales sont estimées puis agrégées au niveau national. ECCC utilise le *Motor Vehicle Emission Simulator* (MOVES) pour calculer les consommations de carburant, puis les oppose à des données descendantes pour atténuer les incertitudes liées au calcul ascendant. MOVES,

développé par l'agence de protection de l'environnement des États-Unis (U.S. EPA ou EPA), est un logiciel qui permet de calculer la consommation énergétique des véhicules et les émissions du transport routier à partir de plusieurs intrants. Dans le cadre de l'inventaire 2022 du Canada, seule la fonctionnalité de calcul de la consommation énergétique est utilisée, et les principaux intrants intégrés au modèle sont les propriétés des carburants, le parc des véhicules différencié par classe de véhicule, et les taux d'accumulation de kilométrage (TAK). Une classe de véhicule se distingue par le type de carburant utilisé, le type de carrosserie (voiture ou camion) et le poids nominal brut du véhicule (PBNV). Le PBNV comprend le poids du véhicule ainsi que sa capacité de chargement. Il sert à distinguer les véhicules légers (PBNV inférieur ou égal à 3856 kg dans le cas de l'inventaire national) des véhicules lourds (PBNV supérieur à 3856 kg). Le TAK est une mesure du kilométrage annuel moyen d'un véhicule appartenant à une classe et à un âge donnés. L'estimation des TAK des provinces et des territoires des véhicules et des camions légers repose sur une étude portant sur l'écart entre les relevés d'odomètre effectués pendant des essais d'inspection et d'entretien en Ontario et en Colombie-Britannique pour ce type de véhicule. Faute de données portant sur d'autres provinces, les TAK de l'Ontario sont utilisés par défaut, excepté pour la Colombie-Britannique comme les données de cette province existent. Une fois les consommations de carburant estimées de manière ascendante avec MOVES, elles sont ajustées pour correspondre aux données descendantes du Bulletin sur la disponibilité et l'écoulement d'énergie au Canada (BDEE). Une fois les consommations de carburant ajustées, les émissions sont calculées en multipliant les consommations de carburant par des facteurs d'émission appropriés pour chaque classe de véhicule.

Concernant la Ville de Montréal, elle a récemment changé d'approche, passant de la méthode des ventes de carburant à une méthode ascendante qui se base sur l'utilisation de l'outil EIE de Google. Pour ses inventaires de 2022 et 2023, la Ville de Montréal utilise les résultats de l'outil EIE de Google qui se base sur la distance parcourue par les différents modes de transport. Les trajets sont estimés à partir des données de position, anonymisées et agrégées. Le paramétrage de Google EIE a été ajusté pour adapter les facteurs d'émission des automobiles et des bus en

utilisant les données de la Régie de l'énergie du Québec, d'ECCC et du ministère des Ressources naturelles et des Forêts (BTER, 2024b; Google, 2024).

Par rapport à l'approche descendante, l'approche ascendante, en se basant sur des données propres aux sources individuelles, donne la possibilité d'identifier des sources d'émission plus spécifiques. Construire un inventaire de GES avec une approche ascendante est ainsi plus adéquat pour ensuite élaborer des stratégies de réduction. En utilisant l'outil Google EIE, la Ville de Montréal utilise une approche ascendante, mais malheureusement l'agrégation des VKT sur l'ensemble de la ville par l'outil Google ne permet pas d'avoir plus de détails. L'approche ascendante a l'inconvénient d'être plus coûteuse et de prendre plus de temps qu'une approche descendante. L'approche ascendante demande également plus de données, données qui ne sont pas forcément disponibles partout (Fong *et al.*, 2021; Gurney *et al.*, 2019a). Pour avoir un inventaire robuste, les deux approches peuvent être utilisées, en utilisant par exemple les résultats de l'approche descendante pour valider ceux de l'approche ascendante (Fong *et al.*, 2021).

1.3.2 Estimation des émissions du transport routier à haute résolution spatiale et temporelle

Plusieurs projets qui visent à élaborer des inventaires avec une plus grande résolution spatio-temporelle que ce qui se fait usuellement au niveau national ou municipal ont vu le jour. Avec la multiplication de l'élaboration des stratégies de réduction à l'échelle infranationale, de tels outils répondent à un besoin politique en permettant de vérifier l'efficacité de ces stratégies (Patarasuk *et al.*, 2016). Le raffinement de l'échelle spatiale (nationale, régionale, urbaine) et temporelle (horaire, journalière, annuelle) diffère selon les travaux. L'approche ascendante est largement utilisée, soit en totalité, soit en la combinant avec une approche descendante.

1.3.2.1 Réduction d'échelle

Plusieurs projets utilisent des données globales dont l'échelle est réduite à l'aide de données d'activités propres aux secteurs d'émission. Cette approche hybride entre approche descendante et ascendante est par exemple utilisée avec le projet *Carbon Monitor Cities*

(<https://cities.carbonmonitor.org/>) pour plusieurs villes dans le monde, ou en France avec MétéoCarbone® (<https://carbondeck.fr/landing>) dans lequel des mesures atmosphériques sont utilisées pour ajuster les résultats d'émissions (Huo *et al.*, 2022; Cucchi *et al.*, 2023).

L'initiative appelée *Carbon Monitor Cities* estime les émissions journalières de CO₂ de plusieurs villes du monde depuis 2019 pour plusieurs secteurs, dont celui du transport routier. Les émissions de CO₂ à l'échelle des villes sont estimées en spatialisant les émissions de l'inventaire d'émissions journalières nationales du *Carbon Monitor* (<https://carbonmonitor.org/>) à l'aide d'émissions cartographiées comme celles de la base de données *Emissions Database for Global Atmospheric Research* (EDGAR) (https://edgar.jrc.ec.europa.eu/dataset_ghg50) qui fournit les émissions nationales par secteur d'activité. Les émissions sont ensuite désagrégées par zones urbaines fonctionnelles ou administratives. En fonction des secteurs, les émissions sont adaptées pour corriger d'éventuels biais causés par la réduction de l'échelle spatiale. Pour le transport routier, les émissions sont ajustées en utilisant les données de congestion horaires TomTom. TomTom est une entreprise néerlandaise spécialisée dans la cartographie et les systèmes de navigation *Global Positioning System* (GPS). Les niveaux de congestion TomTom sont basés sur des données télémétriques, qui sont des données GPS issues des appareils et des applications de navigation et qui fournissent des informations comme la localisation et la vitesse des véhicules (TomTom, 2025a,b). Une relation entre la moyenne quotidienne des niveaux de congestion TomTom et le nombre moyen de véhicules par heure pour le jour j est d'abord établie à partir de données de comptages routiers de Paris en utilisant une régression basée sur la fonction sigmoïde. Cette relation est ensuite appliquée aux données de congestion des autres villes pour y estimer le débit de circulation. Relativement aux débits de circulation ainsi estimés, les émissions du transport routier sont corrigées en supposant : 1) que les variations dans les émissions suivent celles de la circulation ; 2) que les données de congestion et le débit de véhicules dans les autres villes suivent une relation similaire à celle établie pour Paris. Pour les villes où les données TomTom ne sont pas disponibles, l'hypothèse est faite que les variations des émissions suivent celles des autres villes du pays, ou des émissions totales de tous les pays couverts par les données TomTom dans le cas où aucune ville du pays n'ait de données TomTom. Pour

valider les résultats d'émission du *Carbon Monitor Cities*, ils sont comparés à d'autres données d'émissions disponibles pour certaines villes, comme les données de 2015 du projet *Vulcan* (<https://vulcan.rc.nau.edu/>) pour les États-Unis ou les données du *Multi-resolution Emission Inventory* (MEIC) (http://meicmodel.org.cn/?page_id=2351&lang=en) pour la Chine, pour les secteurs où leur définition et leur couverture spatiale avaient une correspondance suffisante. Lors de cette étape de validation, la différence relative moyenne Rd et le coefficient de détermination R^2 sont calculés. La différence relative moyenne représente l'écart entre les valeurs estimées et les valeurs de référence, tandis que le coefficient de détermination R^2 indique la proportion de la dispersion des données qui est capturée. La comparaison avec les émissions d'inventaire des villes chinoises a montré que le coefficient de détermination R^2 est de 0,62 pour le secteur du transport routier (contre 0,93 pour le secteur de l'énergie). La différence relative moyenne Rd est de 21 % (contre 31 % pour le secteur de l'énergie) et est compris dans les plages d'incertitudes, indiquant une bonne précision pour les villes chinoises. Les résultats de la comparaison entre les émissions de 2019 du *Carbon Monitor Cities* et des données de 2015 de *Vulcan*, faute de données plus récentes, indiquent un R^2 de 0,90 pour le secteur du transport routier et un Rd de 41 %. La différence des valeurs d'émissions entre ces deux inventaires s'explique par la différence des années d'inventaire, de méthode (approche descendante pour le *Carbon Monitor Cities* et ascendante pour *Vulcan*) et de différences dans la définition des secteurs et des données (Huo *et al.*, 2022; Dou *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2020b,a). Le projet *Carbon Monitor Cities* présente finalement une résolution spatiale à l'échelle d'une ville, mais celle-ci devrait évoluer dans le futur avec le projet *Carbon Monitor Cities 2.0*, qui prévoit d'estimer les émissions à l'échelle des routes dans le cas des émissions du secteur du transport routier (Ciais *et al.*, 2023). Pour le transport routier, un modèle d'intelligence artificielle (IA) de prédiction de la circulation impliquant des données GPS, des données de comptage et des données sur les routes (type de route et limites de vitesse) seraient utilisées, en se basant notamment sur le travail de Bonnemaizon *et al.* (2024). Combiné avec des informations sur le parc de véhicules, le type de carburant et avec des facteurs d'émission dépendant de la vitesse, le modèle permettrait alors d'obtenir une carte des émissions horaires à l'échelle des routes (Deuskar & Zhou, 2024; Bonnemaizon *et al.*, 2024).

La compagnie de SUEZ Origins.earth, en partenariat avec le Laboratoire des Sciences du Climat et de L'Environnement (LSCE) et la Ville de Paris, a développé MétéoCarbone®, un outil commercial à destination des municipalités permettant de visualiser les émissions de GES sur une carte en temps quasi réel avec une résolution spatiale de 1 km² et temporelle d'une heure. En plus de fournir un inventaire à haute résolution spatio-temporelle, MétéoCarbone® permet également de simuler des scénarios de réduction et ainsi de soutenir des politiques publiques et de favoriser l'adhésion des citoyens. Cette solution repose sur l'affinement des données d'émissions d'un inventaire d'émissions présentant une résolution spatiale de 1 km² et temporelle de 1 h, en exploitant des mesures en continu de la concentration en CO₂ par un réseau de capteurs et une inversion atmosphérique basée sur l'approche bayésienne. Les émissions issues de l'inventaire à haute résolution alimentent un modèle de transport atmosphérique, dont les concentrations en CO₂ ainsi modélisées sont ajustées par l'inversion bayésienne afin de les faire concorder au mieux avec les mesures. En utilisant des mesures atmosphériques, le temps de traitement est réduit puisque les émissions sont accessibles en seulement un mois contre deux ans pour les méthodes d'inventaire traditionnelles (Cucchi *et al.*, 2023). En revanche, l'utilisation d'un modèle de transport atmosphérique peut générer des erreurs, dues par exemple à la difficulté à modéliser adéquatement le transport atmosphérique sous des conditions météorologiques particulières comme des nuages épais ou des fortes pluies (Lian *et al.*, 2021). L'inventaire à haute résolution spatio-temporelle utilisé comme point de départ est construit en partant de données d'inventaires d'émissions de CO₂ annuelles de la région d'Île-de-France qui sont spatialisées par des proxys spatiaux (par exemple la population à haute résolution spatiale) et temporalisées par des données d'activité à haute résolution temporelle. Pour temporaliser les émissions du transport routier, les profils de circulation issus de données de comptages de plus de 3 000 points de mesure de la Ville de Paris sont utilisés. Pour les émissions situées en dehors de Paris, les variations moyennes de la ville sont utilisées, en supposant que les variations temporelles en dehors de la ville suivent les variations moyennes de Paris (Cucchi *et al.*, 2023; Lian *et al.*, 2022, 2023). Les résultats ont montré que les émissions estimées par MétéoCarbone®, après optimisation des émissions de l'inventaire de départ, sont supérieures à celles de ce dernier,

laissant penser que les émissions préalables étaient sous-estimées (Cucchi *et al.*, 2023; Nalini *et al.*, 2022).

1.3.2.2 Utilisation de relevés de circulation

Plusieurs projets ont quantifié les émissions avec une plus ou moins haute résolution en se basant sur des débits journaliers moyens annuels (DJMA), des VMT (ou VKT), issus de relevés de comptages de la circulation (Sitati, Oludhe, Oyake & Mbandi, 2022; Gately, Hutyra & Sue Wing, 2015; Gurney *et al.*, 2012, 2019b; Gurney *et al.*, 2019a). Le DJMA est un indicateur du volume du débit routier couramment utilisé pour des projets de conception et de planification des routes et des transports. Il représente le débit de circulation journalier moyen d'une année sur une route donnée, autrement dit la moyenne de véhicules comptés quotidiennement pour tous les jours de l'année. Il est censé représenter un jour typique de l'année (FHWA, 2022; Garber & Hoel, 2015). Le VMT (ou VKT) peut être obtenu en multipliant le DJMA par la longueur du segment de route (FHWA, 2018).

Le DJMA réel est calculé à partir de comptages effectués sur des sites de comptage continu (appelés aussi sites permanents), qui collectent les volumes de circulation sur 24 h sur les 365 jours de l'année. D'après la *Federal Highway Administration* (FHWA) des États-Unis, plusieurs méthodes sont possibles pour calculer le DJMA, comme la moyenne simple des 365 jours ou encore la méthode de la "moyenne des moyennes" de l'*American Association of State Highway Transportation Officials*, appelée méthode AASHTO (équation 1.2).

$$DJMA = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 \left[\frac{1}{12} \sum_{j=1}^{12} \left[\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n VOL_{ijk} \right] \right] \quad (1.2)$$

Où VOL est le volume de véhicules quotidien du jour k du jour de semaine i du mois j , et n le nombre d'occurrences du jour de la semaine i durant le mois m (FHWA, 2022).

L'acquisition d'un nombre important de données pouvant cependant se révéler coûteuse, le DJMA peut être estimé à partir de comptages réalisés sur de plus petites périodes en utilisant notamment des facteurs d'ajustement du débit de circulation (ou facteurs d'expansion) (Sharma, Gulati & Rizak, 1996; FHWA, 2022). La FHWA recommande d'utiliser des comptages relevés sur la plus grande période possible, les durées les plus courantes étant de 24 et 48 h (FHWA, 2022). Les facteurs d'expansion sont estimés à partir de comptages provenant de sites de comptage continu ou de comptage de contrôle et peuvent être horaires, journaliers et mensuels. Aux sites de comptage de contrôle, les relevés sont effectués mensuellement, mais sur quelques jours seulement, par exemple pendant sept jours de manière à couvrir les sept jours de la semaine (Garber & Hoel, 2015). D'autres techniques d'estimation du DJMA ont émergé pour améliorer sa prédition et l'estimer sur des routes peu couvertes par les sites de comptage (les routes locales par exemple), comme avec l'utilisation de données télématiques (Zhang & Chen, 2020; Chang & Cheon, 2019), d'images aériennes (McCord, Yang, Jiang, Coifman & Goel, 2003; McCord, Goel, NEXTRANS Center (U.S.) & Ohio State University, 2009; Reksten & Salberg, 2021; Ganji, Zhang & Hatzopoulou, 2022), de modèles de régression (Selby & Kockelman, 2013; Apronti, Ksaibati, Gerow & Hepner, 2016; Mathew & Pulugurtha, 2021), ou encore de modèles d'apprentissage machine (Sharma, Lingras, Xu & Kilburn, 2001; Das & Tsapakis, 2020; Sun & Das, 2015).

Aux États-Unis, les projets *Vulcan* et *Hestia* fournissent des inventaires d'émissions de CO₂ d'origine fossile en utilisant une approche ascendante, à l'échelle nationale et pour plusieurs grandes villes respectivement. Les émissions du secteur du transport routier ont une résolution temporelle horaire et sont quantifiées à l'échelle des segments de route (Gurney *et al.*, 2009b; Gurney *et al.*, 2019b, 2012). Pour le transport routier, *Vulcan* part de la *National Mobile Inventory Model County Database* (NMIM NCD) qui fournit les VMT mensuels à l'échelle des comtés et classifiés selon les types de routes et les classes de véhicules. Les VMT sont combinés aux facteurs d'émission en g/mile donnés par le modèle de combustion *Mobile6.2* pour calculer les émissions, qui présentent ainsi une résolution mensuelle et à l'échelle des comtés. Ces dernières voient ensuite leur résolution spatiale et temporelle diminuer en utilisant un profil

spatio-temporel établi à partir de données de comptage, qui sont fournies par la FHWA et obtenues avec un réseau d'enregistreurs automatiques permanents (Gurney *et al.*, 2009b; Gurney *et al.*, 2009a). Pour une ville donnée, *Hestia* utilise les données à l'échelle des comtés en sortie de *Vulcan* pour les distribuer spatialement et temporellement avec les données de comptages collectées par les villes en question. Pour la ville de Los Angeles, la dernière ville comptabilisée à ce jour, la distribution spatiale se fait à partir des DJMA de la *Southern California Association of Governments*, tandis que les données de circulation du *Performance measurement system* (PeMS) et de stations de comptage continues sont utilisées pour la distribution temporelle en appliquant une pondération inverse à la distance (*Inverse distance weighting* en anglais). Les résultats montrent que le transport, et en particulier le transport routier, est le secteur prédominant dans les émissions. La distribution des émissions est également inégale, avec certaines zones qui génèrent la majeure partie des émissions. En comparant avec les résultats d'émissions estimées par l'agence locale de planification métropolitaine, les émissions estimées par *Hestia* sont 10,7 % plus importantes (Gurney *et al.*, 2019b).

De la même manière que pour Los Angeles, l'application du projet *Hestia* au comté de Salt Lake montre la prédominance des émissions du transport routier qui contribue aux émissions de CO₂ du comté à hauteur de 42,9 %. Des pics d'émission ont lieu aux heures de pointe, soit entre 7 h et 8 h et 16 h et 18 h pour les jours de semaine, et entre 15 h et 18 h pour les jours de fin de semaine. En identifiant les routes les plus émettrices du comté et en les comparant à l'offre de transport public, Patarasuk *et al.* (2016) montrent comment un inventaire à haute résolution peut aider à élaborer des politiques de réduction. Les résultats indiquent que les routes principales présentent les plus grandes densités d'émission (en g/km) et contribuent à hauteur de 20 % des émissions totales du comté. Cette prédominance s'explique par le grand nombre de voies (supérieur à quatre) de ce type de route qui accueillent de hauts volumes de circulation. Comme le Plan de développement durable 2015 de Salt Lake City vise la réduction des VMT de 6,5 %, Patarasuk *et al.* (2016) suggèrent de cibler en priorité ce type de route qui concentre environ 28 % des VMT du comté. À l'inverse de la tendance mise en lumière par les densités d'émission, les routes secondaires présentent des intensités d'émissions (en

g/VMT) plus élevées que les routes principales. Cette métrique informe sur d'autres éléments qui affectent la consommation de carburant, comme les comportements de conduite, les conditions de circulation et la composition de la flotte. Alors que les routes primaires sont conçues pour offrir une mobilité routière de manière ininterrompue sur la plus longue distance avec une vitesse la plus élevée possible, les routes secondaires relient la circulation des routes locales aux routes principales sur des distances plus courtes avec des arrêts et des redémarrages fréquents, soit un style de conduite qui mène à des taux d'émission plus élevés. En comparant les routes les plus émettrices avec l'implantation des services de transport public, les auteurs suggèrent d'étendre le réseau de train sur les corridors émetteurs et non couverts par le train. L'expansion du train sur les lignes proposées mènerait à déplacer 25 % du volume de circulation et réduirait les émissions de carbone de 50 000 t/an. Une limite de l'approche utilisée ici est la difficulté de déterminer les facteurs socio-économiques et techniques à l'origine des émissions du transport routier. Pour améliorer la capacité à identifier les origines des émissions et à prévoir ces dernières, les auteurs suggèrent de combiner une modélisation de la demande en transport avec l'approche du projet Hestia (Patarasuk *et al.*, 2016).

1.3.2.3 Utilisation d'un modèle de simulation de la circulation

La quantification des émissions de GES du transport routier à haute résolution spatio-temporelle peut se faire à partir d'un modèle de simulation de la circulation, généralement couplé à des modèles d'estimation d'émission, comme réalisé dans plusieurs études pour n'en citer que certaines d'entre elles (Abou-Senna, Radwan, Westerlund & Cooper, 2013; Fontes, Pereira, Fernandes, Bandeira & Coelho, 2015; Wyatt, 2017; Grujić *et al.*, 2022; Ma, Xu & Jiang, 2023; ROSE & AIRPARIF, 2022; Ministère des Transports et de la Mobilité durable, 2023; Stéphan, 2022).

Un modèle de la circulation a l'avantage de pouvoir simuler l'ensemble des véhicules à l'échelle des sections de route sur une période de temps et un réseau routier spécifiques. Il permet également de visualiser relativement rapidement les émissions après modification des modèles (Wyatt, 2017; Stéphan, 2022). Grujić et al. (2022) utilisent par exemple un modèle à base

d'agents (ABM) (ou *Agent Based Model* en anglais) avec la plateforme GAMA et les facteurs d'émission du *Handbook Emission Factors for Road Transport* (HBEFA) pour estimer les émissions de matières particulaires (PM), de NO_x et de CO des véhicules avec une résolution horaire pour une journée ouvrable dans la ville de Novi Sad en Serbie. La comparaison des émissions modélisées avec les données sur la qualité de l'air disponibles indique une bonne corrélation entre les mesures et les émissions estimées. Cependant, seulement une station a pu être utilisée pour les émissions de PM et de NO_x et deux pour le CO pour comparer les émissions (Grujić *et al.*, 2022). Dans sa thèse, Wyatt (2017) exploite un modèle de circulation avec le logiciel AIMSUN, couplé avec le modèle d'émissions *Passenger car and Heavy duty vehicle Emission Model* (PHEM) pour estimer les émissions de CO₂ du réseau routier de Headingley au Royaume-Uni pour cinq périodes d'une journée de semaine moyenne. Pour évaluer les résultats du modèle couplé AIMSUN-PHEM, Wyatt (2017) compare les taux d'émission (en g/km) du modèle couplé, à ceux provenant de mesures en conditions réelles d'émissions de CO₂ d'un véhicule instrumenté ayant circulé sur le même réseau routier, ainsi qu'à ceux obtenus à partir d'un modèle PHEM alimenté par les données GPS de ce même véhicule. Les résultats de cette comparaison montrent que les émissions simulées sont de bonnes estimations des émissions réelles, avec par exemple, pour une section de route donnée et sur la période de l'heure de pointe du matin, une différence moyenne de -10 % entre les taux d'émissions du modèle AIMSUN-PHEM et ceux obtenus à partir des mesures en conditions réelles. En comparant aux taux d'émission du modèle PHEM alimenté par les données GPS, cette différence est de -0,2 % pour la même période et la même section de route. En plus d'estimer avec une bonne précision les émissions de CO₂, le modèle couplé développé par Wyatt (2017) facilite l'analyse des émissions à plusieurs échelles (à l'échelle du réseau ou des véhicules) et permet de les désagréger en fonction du type de véhicule. Les résultats ont d'ailleurs montré que les émissions variaient en fonction des périodes de la journée, dépendamment des conditions de circulation : dans des conditions de circulation encombrées, le taux d'émission moyen sur l'ensemble du réseau était 43,5 % plus élevé pour les véhicules à essence que dans des conditions de circulation fluide. Le couplage du modèle de circulation AIMSUN avec le modèle d'émission PHEM a donc permis de modéliser adéquatement les émissions du transport routier avec une résolution

spatiale à l'échelle des routes. La résolution temporelle est cependant limitée à des périodes de 2 h à différents moments d'une journée de semaine moyenne (Wyatt, 2017).

Au Québec, la Direction de la modélisation des systèmes de transport du Ministère des Transports et de la Mobilité durable (MTMD) a développé un outil combinant un modèle de simulation routière macroscopique sur le logiciel EMME avec le modèle MOVES. Cet outil permet de quantifier les taux d'émission moyens (en g/km ou g/véhicule) de plusieurs polluants pour les heures de pointe du matin (de 5 h à 8 h 59) et en fonction de la classe de véhicule, du type de carburant (essence ou diesel), de la vitesse et du type de route (autoroute ou artère). Le modèle routier sur EMME est un modèle macroscopique statique régional avec une approche par zones d'analyse des transports (ZAT) et représente les déplacements d'une journée ouvrable typique d'automne. Pour la région de Montréal, le modèle routier est appelé MOTREM. Dans le MOTREM représentant l'année 2013, la demande en transport des véhicules légers particuliers se base sur les données de l'enquête Origine Destination (O-D) 2013, tandis que celles des véhicules légers commerciaux, des camions réguliers et des camions lourds reposent sur des données synthétiques, par manque d'enquête régionale sur leurs déplacements. La création des données synthétiques s'appuie sur des données d'utilisation du sol et du nombre d'emplois par catégorie d'industrie. Le modèle est calibré et validé en utilisant des données de comptage routier et de temps de parcours. Les volumes routiers, temps de parcours et demande O-D de chaque zone obtenus en sortie du logiciel EMME sont ensuite utilisés comme intrants dans MOVES en plus de données locales comme des données climatiques (température et humidité) et la composition des carburants et du parc de véhicules provenant de la SAAQ (Ministère des Transports et de la Mobilité durable, 2023; Ministère des Transports, 2019; St-Pierre, 2019; Phan & St-Pierre, 2020). L'approche utilisée permet de comparer les résultats d'émissions avec ceux issus des inventaires traditionnels qui se basent sur une approche descendante, mais aussi de simuler différents scénarios sur les données de circulation ou les conditions météorologiques. En revanche, les émissions résultantes ne représentent qu'une journée ouvrable moyenne d'automne difficile à annualiser. De plus, la simulation macroscopique ne permet pas de prendre en compte

les conditions de circulation comme les travaux, les accidents et la dynamique de congestion qui peuvent avoir un effet sur les émissions (Phan & St-Pierre, 2020).

Dans le cadre du projet de la Carte Carbone de Montréal, Stéphan (2022) a réalisé une étude visant à fournir des recommandations pour l'estimation des émissions du transport routier à partir d'un modèle de circulation de l'arrondissement de Saint-Laurent couplé à des modèles d'estimations d'émission. Le modèle de circulation, modélisé sur le logiciel AIMSUN, représente la circulation à l'heure de pointe du matin ou de l'après-midi pour une journée ouvrable d'automne. Stéphan (2022) a centré son étude sur l'heure de pointe du matin. Les modèles d'estimation d'émission étudiés sont soit intégrés à AIMSUN, soit externes au logiciel comme MOVES. Par rapport aux autres modèles, MOVES prend en compte plus de phénomènes, comme le préchauffage du moteur ou l'utilisation d'accessoires, ce qui mène à estimer plus d'émissions par rapport aux autres modèles (entre + 2,2 % et + 16,2 %). De plus, les analyses de sensibilité menées lors de cette étude montrent l'importance de la calibration de certains paramètres que ce soit au niveau de la modélisation de la circulation (paramètres d'agressivité des conducteurs) ou au niveau de la modélisation des émissions (âge des véhicules du parc de véhicules montréalais dans le cas de MOVES par exemple) (Stéphan, 2022).

1.3.2.4 Utilisation de l'intelligence artificielle

L'utilisation de l'IA peut également aider à calculer les émissions du transport routier (Ganji, Shekarrizfard, Harpalani, Coleman & Hatzopoulou, 2020; Alfaseeh, Tu, Farooq & Hatzopoulou, 2020; Wen *et al.*, 2022). Ganji et al. (2020) ont développé un outil qui se compose dans un premier temps d'un ensemble de modèles qui estime la circulation, et dans un deuxième temps d'un second module qui utilise la circulation estimée pour calculer les émissions de gaz à effet de serre associées. À partir de données de comptages routiers de différentes stations et de l'identification des tendances dans les données et des lieux qui suivent des tendances similaires, le premier module estime le DJMA sur les routes, y compris aux endroits où il n'existe pas de données de comptage. Pour prendre en compte la vitesse des véhicules dans le calcul des émissions et ainsi adapter les facteurs d'émission en fonction de la vitesse, une relation

entre les volumes de circulation et les vitesses moyennes est établie en utilisant un algorithme d'apprentissage basé sur un réseau de neurones artificiels. Ce modèle d'apprentissage imite les résultats d'un modèle de circulation en utilisant EMME4 pour établir la relation entre volume de circulation et vitesses, et est ensuite utilisé pour estimer les vitesses moyennes à partir des DJMA issus du premier module. L'ensemble des modèles développés est évalué en utilisant les données de la Ville de Toronto, qui collecte entre 2 000 et 3 000 comptages par an à partir d'enregistreurs automatiques de la circulation et 1 500 à 2 000 mouvements tournants. Les résultats montrent que les volumes de circulation estimés sont acceptables et comparables avec ceux observés, tandis que les émissions estimées pour 2015 surpassent de presque 16 % les émissions annuelles rapportées dans l'inventaire de *The Atmospheric Fund* qui se base sur le GPC (Ganji *et al.*, 2020).

En conclusion, les résultats d'inventaires avec une approche ascendante ont tendance à surpasser les émissions établies dans les rapports d'inventaires traditionnels, montrant la nécessité de développer ce type d'approche méthodologique. En revanche, ce type d'approche nécessite que les données nécessaires soient disponibles dans la région étudiée avec une résolution spatio-temporelle suffisante, ce qui n'est pas toujours le cas. De plus, les outils développés, qui sont parfois même commercialisés, sont peu accessibles à la population, alors qu'ils pourraient constituer des outils de sensibilisation et de mobilisation de la population et que l'implication de cette dernière est montrée comme essentielle pour relever le défi de l'urgence climatique (IPCC, 2023b; Gouvernement du Québec, 2022).

1.4 Données de circulation pour Montréal

Cette section regroupe la présentation de différents types de données relatives à la circulation à Montréal qui pourraient être utilisées pour construire un inventaire à haute résolution spatio-temporelle. Parmi celles-ci figurent le modèle de circulation fourni par le SUM de la Ville de Montréal, les données de comptage de la circulation, les données télématiques et les données de l'application MTL Trajet.

1.4.1 Modèle de circulation

Le SUM utilise le logiciel AIMSUN pour construire un modèle de circulation. Ce dernier est alimenté par les résultats de l'enquête Origine-Destination, appelée aussi enquête O-D (intitulée depuis 2023 enquête Perspectives Mobilité), qui a lieu dans la région métropolitaine de Montréal. Dans le cadre de cette étude, le SUM nous fournit le modèle AIMSUN de 2013 couvrant l'arrondissement de Saint-Laurent. Il représente la circulation ayant lieu pour une journée ouvrable d'automne, soit à l'heure de pointe du matin (7-8 h), soit à celle l'après-midi (4-5 h).

Les données des enquêtes O-D alimentent le modèle du MOTREM du MTMD, qui permet de fournir au SUM la demande en déplacement sous forme de matrices O-D et ainsi de construire le modèle AIMSUN de l'arrondissement de Saint-Laurent. La mise à disposition du modèle AIMSUN de 2013 plutôt que de 2018 (correspondant à l'enquête O-D la plus récente donc les données sont publiées) s'explique par le temps nécessaire conséquent pour traiter les enquêtes O-D, construire les modèles, les calibrer et les valider (SUM, communication personnelle, 2024)

1.4.1.1 Enquête Origine-Destination

Les enquêtes O-D sont menées tous les cinq ans par l'Autorité régionale de transport métropolitain (ARTM) sur un territoire appartenant à la région métropolitaine de Montréal qui grandit au fur et à mesure des enquêtes. Le but de ces enquêtes est d'établir un portrait de la mobilité des résidents du territoire pour un jour moyen de semaine, hors jours fériés.

L'enquête O-D de 2013 a eu lieu du 3 septembre au 20 décembre 2013 sur un territoire couvrant 158 municipalités et divisé en 113 strates géographiques. Elle s'est réalisée par le biais d'entrevues téléphoniques en sélectionnant les participants aléatoirement sur la base de la liste des abonnés au service téléphonique et celle des ménages abonnés exclusivement à un service de téléphonie cellulaire. Le taux d'échantillonnage moyen est de 4,35 % et varie selon les strates géographiques. Les données récoltées sont l'origine et la destination des déplacements, leur motif, l'heure de départ, les modes de transports utilisés ainsi que des variables sociodémographiques

telles que l'âge, le sexe ou encore l'occupation principale de chaque personne composant le ménage. Pour représenter la population totale, des facteurs de pondération sont appliqués aux données collectées selon les caractéristiques des ménages et des personnes (ARTM, s.d.).

1.4.1.2 Modélisation AIMSUN de l'arrondissement de Saint-Laurent

Dans cette section sont exposés les principaux éléments nécessaires à la compréhension et à la construction d'un modèle de simulation de la circulation : ses principales composantes à savoir la demande en transport et la capacité du réseau de transport, le processus d'affectation de la circulation, les différentes échelles de modélisation (macroscopique, mésoscopique et microscopique), ainsi que la calibration et la validation du modèle. Pour chaque élément, les aspects théoriques sont présentés avant de décrire si nécessaire les composantes et spécificités du modèle AIMSUN de l'arrondissement de Saint-Laurent à disposition. Le logiciel AIMSUN, acronyme de *Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and non-urban Networks*, tire ses origines d'un projet de recherche de l'Université de Catalogne et est désormais un logiciel commercial (Barceló, 2010).

Un modèle de transport repose sur l'interaction entre deux éléments principaux : la capacité du système de transport et la demande en transport. La capacité du système de transport correspond à l'offre de transport, c'est-à-dire le réseau routier. Le réseau routier est généralement modélisé dans la plupart des logiciels de simulation du transport en traduisant une carte numérique du système à modéliser en un réseau composé de nœuds (*nodes*), symbolisant les intersections et des centroïdes, et de liens (*links*) représentant les routes (Barceló, 2010). La demande en transport peut être modélisée de plusieurs manières, mais l'approche la plus utilisée (et qui est celle correspondant au modèle AIMSUN à notre disposition) est de représenter la demande en transport sous forme de matrices O-D. Les matrices O-D renseignent le nombre de déplacements ayant lieu sur une certaine période entre des points d'origine et de destination appelés "centroïdes" (Barceló, 2010). Deux matrices O-D figurent dans le modèle AIMSUN élaboré par le SUM : une matrice nommée "*car*" (qu'on appelle "voiture" pour la suite du mémoire), et une autre intitulée "camion". Ces deux matrices sont construites à partir de sous-matrices produites par le

MOTREM. La matrice "voiture" consiste en l'addition des sous-matrices des véhicules légers des particuliers, des véhicules légers commerciaux et des camions réguliers, tandis que la matrice camion est composée de la sous-matrice des camions lourds. Les camions réguliers ont été ajoutés à la matrice "voiture" pour simplifier le modèle comme leur nombre est faible devant celui des automobiles. De plus, la longueur des camions réguliers se rapproche plus de celle des véhicules légers que des camions lourds, ce qui fait plus de sens en termes de modélisation de les intégrer avec les véhicules légers (SUM, communication personnelle, 2024). Dans le MOTREM, la demande en transport des véhicules légers des particuliers est définie à partir de l'enquête O-D de 2013. Pour les véhicules légers commerciaux, les camions réguliers et les camions lourds, comme il n'existe pas d'enquête sur leurs déplacements ; leurs matrices sont donc construites de manière synthétique à partir de données d'utilisation du sol et du nombre d'emplois par catégorie d'industrie (Ministère des Transports, 2019). Dans le modèle AIMSUN, les déplacements des bus de la Société de transport de Montréal (STM) sont modélisés à partir d'un plan de transport en commun, qui consiste en une liste des horaires des lignes de bus.

La formalisation des interactions entre la demande et la capacité de transport se fait avec le processus d'affectation des déplacements. Il modélise la manière dont la demande est assignée au réseau routier et permet de calculer les volumes de circulation. Il est donc nécessaire de déterminer la manière dont les usagers optent pour leur itinéraire entre leur origine et leur destination. Pour cela, la principale hypothèse posée se base sur le concept d'équilibre (*user equilibrium*) dans lequel les usagers tendent à minimiser leur temps de parcours personnel en empruntant les itinéraires qu'ils jugent comme les plus courts dans les conditions de circulation existantes. Cette hypothèse est également formulée selon le premier principe de Wardrop (Wardrop, 1952) ou affectation descriptive. L'approche *Dynamic Traffic Assignment* (DTA) ajoute la dimension temporelle et permet de mieux représenter l'évolution temporelle de la congestion de la circulation. Elle découpe la matrice O-D en plusieurs tranches temporelles (généralement 15 minutes), tranches temporelles durant lesquelles les conditions de circulation et les comportements des usagers sont supposés constants. Chaque tranche respecte les conditions d'équilibre de Wardrop, appelées *Dynamic User Equilibrium* (DUE), où tous les trajets entre

une même paire O-D commençant dans le même intervalle de temps ont un coût de déplacement généralisé minimum et égal (Barceló, 2010; Saxena, Irannezhad & Soet, 2021). Dans le logiciel AIMSUN, l'affectation dynamique des chemins peut se faire selon deux méthodes lorsque la modélisation est microscopique ou mésoscopique : soit en se basant sur des modèles de choix d'itinéraire avec la méthode *Stochastic Route Choice* (SRC), soit en se basant sur l'approche DUE. Avec la méthode SRC, le choix des itinéraires est optimisé en se basant sur les informations disponibles sur un certain intervalle de temps, tandis que la méthode DUE est une méthode itérative qui fait en sorte que pour chaque pas de temps, les véhicules qui partent au même moment minimisent leur temps de trajet. La méthode SRC vise à représenter le fait que dans certaines situations réelles, la réaction des conducteurs ne mène pas à des décisions qui font en sorte de respecter le principe de Wardrop dans sa version dynamique (Barceló, 2010; Stéphan, 2022). Plusieurs scénarios de simulation sont disponibles dans le modèle AIMSUN utilisé dans cette étude : l'un à l'échelle mésoscopique avec une affectation dynamique DUE (notée MESO-DUE pour simplifier), et le second à l'échelle microscopique dont la demande est affectée dynamiquement avec la méthode SRC (abrégée en MICRO-SRC). Comme expliqué dans Stéphan (2022), ces combinaisons ont été réalisées pour comparer les résultats d'émissions pour différentes échelles et modèles d'émissions, tout en trouvant un compromis avec le temps de calcul puisque les simulations DUE demandent plus de capacité. En fonction du choix de la méthode d'affectation des chemins, le comportement simulé n'est pas le même. En effet, la méthode DUE implique une attitude où les conducteurs connaissent leur trajet et les débits de circulation qui en résultent sont plutôt représentatifs d'un jour de semaine classique, alors qu'avec la méthode SRC les décisions des conducteurs sont prises comme s'ils effectuaient le trajet pour la première fois (Stéphan, 2022).

Les flux de circulation peuvent être simulés selon trois échelles de modélisation qui se différencient par le niveau de détail de la modélisation : microscopique, mésoscopique et macroscopique. Avec une modélisation macroscopique, les flux sont caractérisés par des variables macroscopiques agrégées comme la densité, le volume et la vitesse. Cette approche agrégée permet d'effectuer des calculs sur des réseaux à grande échelle sans nécessiter trop de puissance de calcul, mais

elle ne permet pas d'obtenir des résultats détaillés, ce qui est pénalisant pour construire un inventaire à haute résolution spatio-temporelle. Inversement, dans la modélisation microscopique, le mouvement de chaque véhicule individuel est décrit à chaque instant, ce qui implique la modélisation des accélérations et décélérations, des changements de voie, et d'autres actions en réponse à la circulation. Modéliser à l'échelle microscopique nécessite plus de données et de temps de calcul, mais permet de modéliser plus finement et de rendre les résultats sensibles aux comportements de conduite des conducteurs. Enfin, la modélisation mésoscopique simplifie la modélisation par rapport à l'échelle microscopique tout en gardant les aspects dynamiques essentiels et permet ainsi d'utiliser moins de données et de temps de simulation. La simulation mésoscopique ne considère un véhicule que lorsqu'il entre et sort d'une section de route et ne simule pas le mouvement intermédiaire. En sortie des modèles mésoscopiques et microscopiques, plusieurs variables peuvent être obtenues pour chaque section de route comme les débits, la densité, la vitesse moyenne ou encore le temps de parcours (Barceló, 2010; Stéphan, 2022; Aimsun Next Users Manual, 2024b,a).

Pour s'assurer que la simulation est suffisamment fidèle à la réalité, le modèle de simulation nécessite d'être soumis à une étape de validation. Dans l'étape de validation, les paramètres du modèle sont calibrés dans le but de faire correspondre au mieux les résultats de la simulation avec des données réelles. Ainsi, la validation vise à vérifier si le modèle de simulation reflète précisément le système analysé tandis que l'objectif du processus de calibration est d'identifier les valeurs correspondant à ces paramètres qui donneront lieu à un modèle valide. Plusieurs indicateurs pour mesurer la qualité de la calibration et de la validation existent. Barceló at al. en ont recensé plusieurs, dont l'écart quadratique moyen (RMSE pour *root mean square error* en anglais) qui représente l'erreur globale ou encore l'erreur quadratique moyenne normalisée (RMSNE pour *root mean squared normalized error*), qui renseigne sur l'ampleur des erreurs par rapport à la mesure moyenne, ou encore la statistique Geoffrey E. Havers, notée GEH (Highway Agency, 1996). Le GEH est reconnu par de nombreux praticiens et permet de calculer un indice pour chaque station de comptage et de rejeter ou non la qualité du modèle en fonction de seuils qui sont déterminés de manière empirique. Barceló et al. (2010) spécifient que dans la

pratique, la calibration et la validation sont des défis majeurs, notamment pour les simulations microscopiques comme les modèles comportent beaucoup d'incertitudes et de paramètres (Barceló, 2010). Le modèle AIMSUN de l'arrondissement de Saint-Laurent, fourni par le SUM, est calibré uniquement pour la modélisation MESO-DUE, et ce en calibrant seulement les débits de circulation (Stephan, 2022 ; SUM, communication personnelle, 2024). Dans le paramétrage du modèle utilisé par Stéphan (2022), le modèle MICRO-SRC prend en entrée le plan d'affectation des chemins de la dernière itération du modèle MESO-DUE pour tenter d'obtenir des volumes de circulation similaires à la simulation MESO-DUE comme celle-ci est calibrée (Stéphan, 2022).

1.4.2 **Données de comptage**

Les données de comptage sont des mesures du nombre de véhicules circulant à certains endroits du réseau routier. À Montréal, plusieurs jeux de données existent, relevant de la Ville de Montréal ou du MTMD. Statistique Canada fournit également des relevés de circulation, mais ceux-ci comportent certaines limites pénalisantes dans le cadre de ce projet.

1.4.2.1 **Comptages aux intersections**

La Ville de Montréal publie régulièrement sur la plateforme des données ouvertes la base de données *Comptages des véhicules, cyclistes et piétons aux intersections munies de feux de circulation* (<https://donnees.montreal.ca/dataset/comptage-vehicules-pietons>). Elle répertorie dans les 19 arrondissements de Montréal le nombre de véhicules, cyclistes et piétons sur la majeure partie des intersections disposant de feux d'intersections, en plus de quelques autres intersections. Les données disponibles sont relevées entre 2008 et l'année courante. Le but premier de ces comptages est la mise aux normes des feux d'intersection (Ville de Montréal, 2025a).

La grande majorité des comptages sont mesurés au moyen de caméras et d'algorithmes de détection de Miovision (<https://miovision.com/>) (Données ouvertes, communication personnelle, 2023). Les usagers sont distingués entre automobiles, camions et bus (entre autres), mais la

distinction plus fine au sein des camions (camions légers, lourds, porteurs et articulés) n'est pas systématique pour chaque intersection (Ville de Montréal, 2025a). La classification des véhicules est faite en détectant sur la vidéo la forme générale des véhicules. Le tableau 1.3 synthétise la classification donnée par Miovision. La classe FHWA correspondante renseignée est uniquement à titre indicatif pour se représenter le type de véhicule correspondant à l'identification réalisée par les algorithmes de détection (Miovision, 2024).

Les relevés sont effectués à des intervalles de 15 minutes pour des durées variant de 3 à 8 h. Pour une intersection donnée, la couverture temporelle est limitée puisque seulement un ou quelques jours dans l'année sont couverts, dépassant rarement une semaine pour des raisons de coûts. Les enregistrements sont donc généralement faits uniquement pour des besoins précis sur de courtes périodes (Données ouvertes, communication personnelle, 2023). En revanche, pour l'intersection Marcel-Laurin/Thimens située dans l'arrondissement de Saint-Laurent, la couverture temporelle est plus élevée que pour les autres intersections. En effet, sur cette intersection, entre mai 2015 et mai 2016, les relevés sont effectués pendant 24 h sur 7 jours de semaine durant 12 mois, en distinguant les automobiles, les bus et les camions (Ville de Montréal, 2025a).

Tableau 1.3 Classification des véhicules utilisée dans le jeu de données des
Comptages des véhicules, cyclistes et piétons aux intersections munies de feux de circulation

D'après les données de Miovision (2024)

Type de véhicule	Définition	Classe FHWA correspondante
Moto	Motos, mobylettes, bicyclettes motorisées, motos à trois roues	Classe 1
Voiture	Véhicules de transport de passagers. Inclut notamment : berlines, coupés, breaks, VUS, fourgonnettes, limousines, minivans, camping-cars, petites ambulances	Classe 2
Véhicule utilitaire	Véhicules légers de transport de marchandises. Inclut notamment : pickups, camionnettes, dépanneuses, etc.	Classe 3 et 5
Bus	Bus de transport de passager, dont bus scolaires et bus articulés	Classe 4
Camion porteur	Véhicules rigides à châssis unique avec un poids total autorisé en charge supérieur à 3,5 tonnes Inclut notamment : camions, dépanneuses, camping-cars, grandes ambulances	Classe 5-7
Camion articulé	Véhicules de transport de marchandises articulés	Classe 8-13

1.4.2.2 Débits de circulation sur le réseau du MTMD

Sur la plateforme de Données Québec (<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/debit-de-circulation>) sont disponibles les débits de circulation des routes et autoroutes gérées

par le MTMD correspondant aux dix dernières années (Ministère des Transports et de la Mobilité durable, 2024a). Certains relevés sont effectués de manière permanente par des boucles de détection à induction (pour plus de 90 % des sites permanents) ou des radars, ou temporairement grâce à des caméras, magnétomètres ou tubes pneumatiques (MTMD, communication personnelle, 2024). Sur les sites permanents, le nombre de véhicules est enregistré sur 24 h et 365 jours dans l'année (excepté en cas de pannes ou de bris des appareils). Les débits à disposition dans le jeu de données des sites permanents sont présentés sous des temporalités horaires (moyennées ou non) et journalières (moyennées). Les données moyennées le sont selon le mois et le jour de la semaine. La différenciation des véhicules dans ces jeux de données est limitée dans la mesure où les données des camions peuvent être fournies séparément, mais pas systématiquement. L'annexe I donne plus d'informations sur le détail du contenu des fichiers Excel disponibles pour les sites permanents. Dans ces jeux de données, le DJMA calculé par le MTMD est également fourni pour les différentes sections de route. Celui-ci est calculé en excluant les journées non représentatives, comme les jours de tempête de neige, de travaux ou de jours fériés (MTMD, communication personnelle, 2024).

1.4.2.3 Tableau de bord des flux de circulation

Statistique Canada fournit à titre expérimental un tableau de bord des flux de circulation (<https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/71-607-x/71-607-x2022018-fra.htm>) qui renseigne sur des débits de circulation quotidiens mesurés à l'aide de caméras pour plusieurs villes du Canada dont Montréal. Toutes les 10 minutes, des images statiques sont extraites des enregistrements des caméras. Le nombre de véhicules par image est compté grâce à un modèle de détection d'objets en temps réel. Les données disponibles sont la somme du nombre de véhicules détectés sur les images extraites toutes les 10 minutes, et par conséquent ne représentent pas le volume quotidien réel. Plusieurs méthodes sont proposées par Eckert et Al-Habashna pour estimer le débit quotidien (Eckert & Al-Habashna, 2022; Statistique Canada, 2024), mais la donnée résultante ne représente donc pas une mesure réelle et reste une estimation. De plus, le comptage des véhicules n'est pas différencié selon leur classe.

La figure 1.5 représente l'emplacement des données de circulation dans l'arrondissement de Saint-Laurent et aux alentours. Cette carte illustre le réseau routier modélisé dans le modèle AIMSUN de l'arrondissement de Saint-Laurent fourni par le SUM, ainsi que les sites des comptages de la circulation présentés ci-dessus.

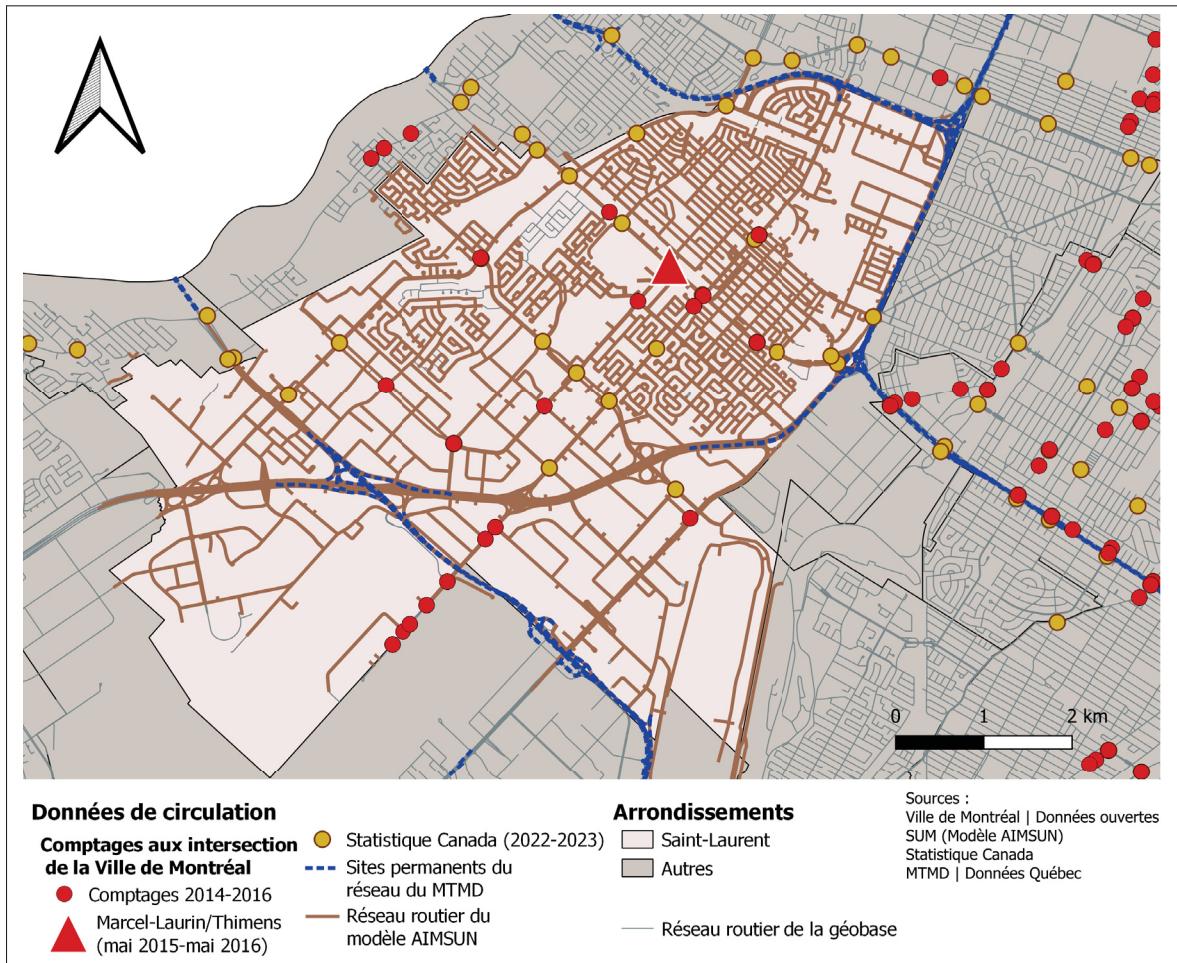


Figure 1.5 Emplacement des données de circulation dans l'arrondissement de Saint-Laurent et aux alentours

1.4.3 Données télématiques

Les données télématiques réfèrent à l'ensemble des données collectées et transmises par les technologies de télécommunications entre des appareils et des objets distants. Elles sont souvent

utilisées dans le domaine du transport et de la gestion de la flotte de véhicules. Les données collectées peuvent inclure la position géographique via GPS, la vitesse, le kilométrage, les trajets et temps de trajet, la consommation de carburant ou encore le comportement des conducteurs (Sathya, 2024). Streetlight (<https://www.streetlightdata.com/>), HERE (<https://www.here.com/>), TomTom (<https://www.tomtom.com/products/traffic-stats/>) et Replica (<https://www.replicahq.com/>) sont des exemples de compagnies fournissant de telles données.

Fondée en 2011, Streetlight développe des métriques sur les déplacements en exploitant et en analysant les *Big Data* (aussi appelées données massives). Streetlight a notamment développé des modèles d'apprentissage machine pour estimer le DJMA pour plus d'un million de kilomètres de routes urbaines et rurales au Canada. De multiples sources de données sont utilisées en entrée des modèles : des données de déplacements issus des services de localisation (aussi appelés *Location-based services* (LBS)) et de données GPS personnelles et commerciales, des données démographiques, des données routières (classification routière, nombre de voies et limite de vitesse entre autres) et des données météorologiques qui peuvent affecter la circulation (température et précipitations par exemple). L'entraînement et la validation des modèles d'apprentissage machine développés reposent sur des relevés de circulation par des compteurs permanents et temporaires situés dans tout le Canada. Pour valider le modèle, plusieurs mesures de l'erreur sont réalisées, dont celle de l'erreur absolue moyenne en pourcentage (ou *mean absolute percentage error* (MAPE) en anglais). Plus cette valeur est faible, meilleure est l'estimation. L'erreur est calculée pour plusieurs catégories de routes, qui se distinguent selon l'importance du volume de véhicules qui y circulent puisque les routes présentant un débit plus faible auront automatiquement une erreur plus élevée comme celle-ci est exprimée en pourcentage. Les derniers résultats publiés au moment de l'écriture de ce mémoire indiquent une forte corrélation entre les DJMA estimés et ceux issus des compteurs permanents avec un coefficient de détermination R^2 de 0,96 pour les DJMA de 2019 et de 0,94 pour ceux de 2020. En ce qui concerne l'erreur, les MAPE calculés varient entre 35,8 % et 9,5 % selon les catégories de route, avec comme attendu une erreur plus grande pour les routes à faible débit de circulation. La comparaison avec les comptages montre également que le modèle a tendance à

surestimer le DJMA pour les routes à faible débit de circulation, tandis que le DJMA des routes présentant un débit plus élevé a tendance à être sous-estimé (Streetlight, 2023b). En plus de quantifier les DJMA, Streetlight a également développé des méthodes pour estimer les débits journaliers moyens mensuels (notés MADT pour *monthly average daily traffic volumes*), et les débits pour des périodes de temps spécifiques. Pour déterminer les MADT, un modèle de machine-learning a été développé en utilisant notamment comme variable d'entrée les DJMA estimés avec leurs modèles. Pour les volumes de circulation sur des périodes spécifiques, un facteur d'ajustement temporel est appliqué aux MADT précédemment calculés. Ces facteurs d'ajustement correspondent au ratio entre les déplacements LBS ayant lieu sur la période de temps considérée et ceux du mois correspondant. De la même manière que pour les DJMA, les débits calculés sont comparés à des données de comptages pour valider les estimations. En traçant le MAPE ainsi que les débits estimés et les débits issus des comptages en fonction des mois entre 2019 et 2024, les résultats montrent que les débits estimés représentent globalement bien les tendances temporelles, y compris pour les routes à faible débit (Streetlight, 2023a, 2024).

L'information présente dans les données télématiques est riche et présente une couverture spatio-temporelle qui peut se révéler intéressante dans le cadre du développement d'un inventaire à haute résolution pour le transport routier. Cependant, ces données appartiennent à des organismes privés et leur coût peut être assez conséquent.

1.4.4 Données MTL Trajet

L'application MTL Trajet a été créée par la Ville de Montréal en partenariat avec l'Université Concordia pour collecter les déplacements des utilisateurs sur un mois par an. Les années où la collecte de données a eu lieu et où elles sont disponibles sont 2016 et 2017. Dans l'application, les utilisateurs renseignent les informations sociodémographiques de leur ménage. Une méthode d'intelligence artificielle détecte les débuts et fins des trajets. Après un trajet, les utilisateurs indiquent le motif de déplacement et le mode de transport utilisé. Les données sont disponibles sur la plateforme des Données ouvertes (<https://donnees.montreal.ca/dataset/mlt-trajet>). Elles se

composent des trajets des utilisateurs d'une part, et des coordonnées GPS de l'emplacement des usagers à différents moments de leurs déplacements d'autre part. Par souci de confidentialité, les débuts et fins de trajets sont tronqués pour éviter de rendre identifiable la localisation du domicile ou du lieu de travail des utilisateurs (Ville de Montréal, 2017a,b; Labidi, 2020). Les données étant collectées sur un mois seulement par an et l'opération ne semblant pas avoir été répétée, l'utilisation de ces données dans le but de construire un inventaire à haute résolution spatio-temporelle semble peu pertinente.

Plusieurs types de données de circulation de source publique ou privée existent pour Montréal, dont les principales caractéristiques sont synthétisées dans l'annexe II. Cependant, leur couverture et leur résolution spatiale et temporelle, ainsi que la définition des différentes catégories de véhicules diffèrent, ce qui limite leur application et leur fusion pour construire un inventaire des émissions du transport routier à haute résolution spatio-temporelle.

1.5 Données de modélisation des émissions du transport routier

Pour être en mesure d'estimer les émissions générées par le transport routier, outre le fait de connaître le débit de circulation sur les routes, disposer de la composition de la flotte de véhicules, sa consommation de carburant et les facteurs d'émission associés est nécessaire. Les sections suivantes explorent les données disponibles qui pourraient être utilisées dans le contexte montréalais, à savoir à l'échelle de Montréal, provinciale ou canadienne.

1.5.1 Outil de consommation de carburant adapté au parc montréalais

Dans le cadre du projet de la Carte Carbone, Castells (2022) a développé un outil fusionnant les données de la SAAQ des véhicules immatriculés au Québec avec les guides de consommation de carburant de Ressources naturelles Canada (RNCAN) afin de permettre d'estimer les consommations des véhicules légers de la région administrative de Montréal (Castells, 2022). Cet outil est composé de trois programmes Python qui adaptent les deux bases de données de manière à ce que ces dernières puissent être fusionnées, et qui calculent les consommations

de carburant moyennes par type de carburant. La fusion entre les deux jeux de données se base sur la marque, le type de carburant, le nom du modèle et son année. Les consommations de carburant moyennes peuvent être calculées distinctement pour les véhicules de promenade d'une part, et pour les véhicules d'utilisation professionnels, commerciaux et institutionnels d'autre part, tels que définis dans les données des véhicules en circulation de la SAAQ (SAAQ, 2023a). En fonction des années de références utilisées pour les jeux de données de la SAAQ et de RNCAN, il est à noter que certaines modifications dans le code nécessitent d'être réalisées pour la bonne utilisation de l'outil en raison des modifications de certaines variables effectuées par les propriétaires des bases de données.

1.5.1.1 Véhicules en circulation

L'ensemble des véhicules autorisés à circuler au Québec sont enregistrés dans le jeu de données des véhicules en circulation de la SAAQ (<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/vehicules-en-circulation>). Pour chaque véhicule enregistré figurent, entre autres informations, le type de véhicule (automobile ou camion léger, motocyclette, autobus, camion, etc.), son utilisation (promenade, institution, professionnelle ou commerciale, circulation restreinte, hors réseau), sa marque, son modèle, l'année du modèle, le type de carburant, la région administrative de résidence du propriétaire ou encore la municipalité régionale de comté de résidence du propriétaire d'un véhicule. L'information sur le type de carburant n'est cependant disponible que pour les fichiers des véhicules en circulation postérieurs à l'année 2017 (SAAQ, 2023a).

1.5.1.2 Guides de consommation de carburant

Ressources naturelles Canada fournit les cotes de consommation de carburant des véhicules légers neufs vendus au Canada (RNCAN, 2024a). Les consommations de carburant sont obtenues à partir d'essais normalisés et contrôlés en laboratoire par les constructeurs. Pour les données postérieures à 2015, les consommations de carburant sont issues des essais à cinq cycles où différentes conditions de conduite sont simulées : conduite par temps froid, conduite par temps chaud avec la climatisation, conduite à haute vitesse avec accélérations rapides, conduite en

ville avec arrêts et démarrages fréquents, conduite sur l'autoroute et en milieu rural. De 1995 à 2014, les cotes de consommation de carburant étaient obtenues à partir de la procédure d'essai à deux cycles (conduite en ville et conduite sur route). Elles ont alors été ajustées en utilisant les formules de la méthode à cinq cycles de l'EPA, mais ne correspondent pas à des mesures directes d'essais des véhicules (RNCAN, 2018). Trois types de cotes de consommation de carburant sont indiquées dans les jeux de données : une cote intitulée "Ville", "Route" et une "Combinée". La cote en ville représente la consommation pour un parcours urbain avec des arrêts et démarrages, celle sur route reflète un parcours plus long sur des routes principales et secondaires, et celle combinée correspond à un parcours effectué à 55 % en ville et 45 % sur la route (RNCAN, 2024b).

1.5.2 Outil CURB

L'outil *Climate Action for Urban Sustainability* (CURB) est un outil sous forme de fichier Excel développé par la *World Bank* et le *C40 Cities Climate Leadership Group*. Il vise à aider les villes à la planification et à l'implémentation de plusieurs actions pour réduire leurs émissions de GES. L'outil se compose de plusieurs volets, dont l'un qui dresse un inventaire des émissions en adaptant les données au pays sélectionné en entrée. Pour le secteur du transport, les consommations de carburant (sous forme de *Vehicle Fuel Efficiency* en km/L) sont issues de l'*International Council on Clean Transportation*, lequel renvoie pour le Canada aux données de RNCAN. Les facteurs d'émission utilisés et exprimés en t/GJ proviennent, au choix, de l'EPA, de la base de données du gouvernement britannique ou du GIEC (The World Bank, 2016; World Bank Group, 2017). L'outil Google EIE utilisé par la Ville de Montréal se base sur la répartition des véhicules selon le type de carburant, la consommation moyenne de carburant et les facteurs d'émission de l'outil CURB (Google, 2024; Rollin, 2023).

1.5.3 MOVES

Le logiciel MOVES développé par l'U.S. EPA permet de modéliser de manière ascendante les émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre générées par différents types de

véhicules (sur route et hors route). Les émissions peuvent être modélisées de manière horaire à l'échelle nationale, du comté ou bien, dans le cas du transport routier, à une échelle plus détaillée si les intrants sont adaptés. MOVES emploie une méthode de regroupement où chaque seconde d'un cycle de conduite est associée à un mode de fonctionnement. Les émissions sont calculées en fonction de processus physiques distincts comme les émissions émises lors du fonctionnement, du démarrage ou encore lors de ralentis prolongés pour ne citer que certains phénomènes pris en compte par le logiciel (U.S. EPA, 2024).

MOVES classe les véhicules dans différentes catégories en fonction du type de carburant, la classe réglementaire, l'année du modèle et l'âge. Pour chaque catégorie, les caractéristiques des véhicules, le VMT, la vitesse et les cycles de conduite sont utilisés pour définir le temps passé dans un certain mode de fonctionnement. Les modes de fonctionnements sont définis par certains paramètres qui varient en fonction du phénomène d'émission considéré. Pour les émissions à l'échappement lors du fonctionnement, les paramètres utilisés sont la vitesse instantanée du véhicule, son accélération et la puissance spécifique du véhicule appelée *Vehicle Specific Power* (VSP). Le VSP correspond à la puissance demandée pour que le véhicule avance, et est défini comme le ratio entre sa puissance instantanée et sa masse. Un facteur d'émission, exprimé en gramme par heure d'opération, est associé à chaque mode d'opération. Les émissions sont ainsi obtenues en multipliant les facteurs d'émission par les heures d'opération passées dans chaque mode. Les émissions sont ajustées en fonction des conditions locales en prenant en compte certains paramètres comme les caractéristiques des carburants, la température ou encore l'humidité (U.S. EPA, 2024; U.S. EPA, 2019; Koupal, Cumberworth, Michaels, Beardsley & Brzezinski, 2022). La capacité d'adapter les paramètres de MOVES pour faire correspondre les paramètres influençant les émissions au contexte montréalais et la prise en compte de nombreux phénomènes d'émissions en font un outil intéressant. Dans son mémoire, Stéphan (2022) recommande le logiciel MOVES dans le cadre du projet de Carte Carbone, présentant l'avantage d'utiliser les résultats du modèle AIMSUN mésoscopique qui est calibré par le SUM en plus de modéliser plus de phénomènes d'émission que les autres modèles d'émissions étudiés (Stéphan, 2022).

En résumé, plusieurs bases de données contenant des informations spécifiques au contexte montréalais, québécois ou canadien existent et permettent d'adapter localement le calcul des émissions. De plus, la manière de déterminer les facteurs d'émission diffère en fonction des bases de données. Le choix des sources de données a donc un effet sur les émissions résultantes.

1.6 Bilan et objectifs

Les gouvernements et municipalités ont pris des engagements pour limiter leurs émissions de gaz à effet de serre causant les changements climatiques, dans l'objectif de respecter les Accords de Paris. Le secteur du transport routier se retrouve comme un poste d'émission majoritaire, toutes échelles confondues, montrant la nécessité d'agir en vue de réduire les émissions associées.

Pour suivre les émissions générées et les effets des politiques, des rapports d'inventaires sont produits en se reposant sur les lignes directrices du GIEC et du GPC. À Montréal, la méthode pour estimer les émissions du transport routier a récemment évolué puisqu'une approche ascendante est désormais utilisée à l'aide de l'outil Google EIE, qui fournit une valeur annuelle unique. Or, estimer les émissions avec une plus haute résolution spatio-temporelle permettrait d'identifier les paramètres influençant les émissions et évaluer l'efficacité des stratégies de réduction qui sont élaborées à l'échelle locale. Dans la littérature scientifique, des études présentent des méthodes permettant une haute résolution spatio-temporelle. Cependant, ces outils sont peu accessibles à la population qui est pourtant un acteur essentiel dans la transition vers une société plus sobre et résiliente. Contrairement à MétéoCarbone qui est un outil commercial, la Carte Carbone de Montréal se veut être un outil de sensibilisation libre d'accès pour la population en plus d'un outil d'aide à la décision pour les politiques. L'accessibilité des données nécessaires constitue un frein à l'application des méthodes vues dans la littérature puisqu'elles ne sont pas forcément disponibles partout et peuvent avoir un coût non négligeable. À Montréal, des comptages de la circulation existent, mais leur couverture temporelle et spatiale est limitée puisque les sites de comptage permanents se situent uniquement sur des autoroutes. La disponibilité limitée des données constitue ainsi un défi pour la construction d'un inventaire à haute résolution spatio-temporelle.

L'objectif principal de cette étude est de développer une méthode qui permette de quantifier les émissions de GES du transport routier avec une haute résolution spatio-temporelle, et de l'appliquer à l'arrondissement de Saint-Laurent. La zone d'étude se délimite à un arrondissement puisque travailler sur un plus petit territoire que la Ville de Montréal au complet facilite le développement méthodologique. L'idée est ensuite de répliquer (hors cadre de la présente recherche) la méthode définie sur l'ensemble du territoire de la ville dans le cadre de la Carte Carbone. La diversité sectorielle de l'arrondissement de Saint-Laurent en fait d'ailleurs une zone d'étude pertinente à analyser, l'arrondissement comportant des installations industrielles, commerciales, institutionnelles et résidentielles (Beaudette, Deschênes, Giroux-Denis, Lobos & Tacquet, 2017). La résolution spatiale recherchée est à l'échelle des routes, tandis que pour la temporalité, on vise à obtenir une résolution horaire, tout en ayant la possibilité de visualiser les émissions de manière journalière et mensuelle.

Le premier sous-objectif est d'exploiter le modèle de circulation AIMSUN de l'arrondissement de Saint-Laurent fourni par le SUM afin de façonner une technique pour obtenir les VKT avec une haute résolution spatio-temporelle. Le choix de l'utilisation du modèle AIMSUN se justifie par plusieurs raisons dans le contexte de la Carte Carbone. En plus de permettre d'obtenir des débits à l'échelle des segments de route pour le réseau routier de l'arrondissement de Saint-Laurent, l'utilisation du modèle AIMSUN fait suite au travail de Stéphan (2022) qui a posé plusieurs recommandations quant à son utilisation dans le cadre de la Carte Carbone. De plus, un autre objectif de la Carte Carbone, non inclus dans ce mémoire mais étudié par une autre étudiante en maîtrise (Marie-Alice Porta), est de modéliser des scénarios de mobilité, objectif facilité par l'utilisation du modèle AIMSUN.

Le deuxième sous-objectif de cette étude est de développer une méthode pour estimer les émissions de gaz à effet de serre avec la résolution spatio-temporelle recherchée, en se basant sur des facteurs d'émission et consommations de carburant appropriés. Au vu des avantages que présente MOVES pour modéliser les émissions du transport routier, son utilisation est attrayante, mais dans le cadre d'une modélisation à l'échelle des segments de route, l'utilisation de MOVES requiert de disposer des vitesses moyennes des véhicules avec la même résolution

spatio-temporelle que les débits. L'obtention de ces données étant un défi supplémentaire, MOVES n'est pas employé ici. L'acquisition des vitesses à haute résolution spatio-temporelle et l'utilisation de MOVES sont en revanche discutées dans les recommandations.

Enfin, le troisième sous-objectif est de valider les estimations et de poser des recommandations pour la construction de la Carte Carbone.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre détaille la méthodologie développée pour estimer les émissions de gaz à effet de serre du transport routier à haute résolution spatio-temporelle dans l’arrondissement de Saint-Laurent. Les émissions quantifiées se limitent au scope 1, c'est-à-dire aux émissions du transport routier ayant lieu sur le territoire de l’arrondissement. Se limiter au scope 1 signifie que les émissions dues à la production d'électricité pour recharger les véhicules électriques ne sont pas prises en compte. En raison du mix électrique québécois provenant à 99 % de sources renouvelables, les émissions du scope 2 sont de toute façon très faibles (Régie de l'énergie du Canada, 2024). La figure 2.1 résume la méthodologie employée. La numérotation indiquée dans ce schéma correspond aux sections du chapitre 2.

La méthodologie développée comporte deux modules. Le premier concerne l'estimation des débits et des VKT à haute résolution spatio-temporelle en combinant les données de sortie du modèle de circulation AIMSUN de l’arrondissement de Saint-Laurent avec des facteurs d'ajustement du volume de circulation calculés à partir de données de comptages. Le deuxième est l'estimation des émissions à partir des VKT déterminés dans la première partie. Chaque module comprend une étape d'évaluation des grandeurs estimées à l'aide de données de référence établies par les instances publiques. L'ensemble des opérations réalisées sont effectuées à l'aide de codes Python pour semi automatiser les calculs. Plus de détails sur les codes Python réalisés sont présentés dans l'annexe III.

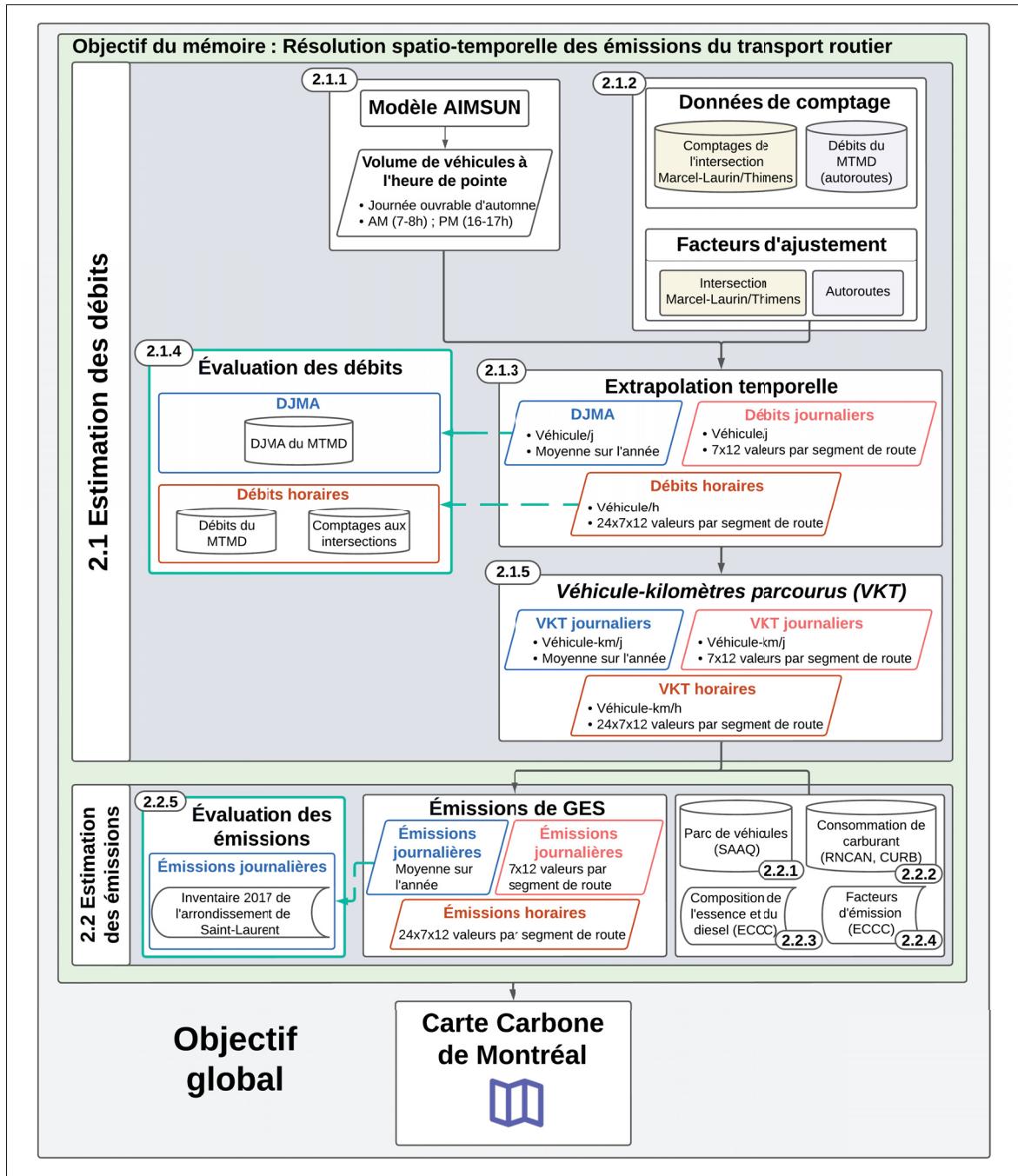


Figure 2.1 Méthodologie du mémoire

2.1 Estimation de la circulation à haute résolution spatiale et temporelle

La circulation à haute résolution spatio-temporelle est estimée grâce à la combinaison des données en sortie du modèle AIMSUN et des facteurs d'ajustement de la circulation. Les débits ainsi déterminés sont comparés à des comptages routiers afin d'évaluer la qualité des estimations. Les VKT qui permettront ensuite de calculer les émissions sont enfin déterminés à partir des débits estimés.

2.1.1 Modèle de circulation AIMSUN de l'arrondissement de Saint-Laurent

Le logiciel AIMSUN Next version 24.0.0 avec la licence étudiante est utilisé pour exploiter le modèle AIMSUN de l'arrondissement développé par le SUM (Aimsun, 2024). Il s'agit du même modèle étudié par Stéphan (2022) et aucun changement dans la modélisation n'a été effectué. Plusieurs simulations sont disponibles dans le modèle, qui se distinguent selon l'échelle de modélisation, la méthode d'affectation des chemins et l'heure de pointe de la journée ouvrable d'automne représentée. Comme seules les modélisations mésoscopiques ont été calibrées, seules les simulations MESO-DUE pour l'heure de pointe du matin entre 7 et 8 h et celle de l'après-midi entre 16 et 17 h sont exploitées dans ce mémoire. Elles sont notées respectivement "MESO DUE AM" et "MESO DUE PM". Si un modèle à l'échelle microscopique calibré était disponible, la méthode développée pourrait également s'appliquer.

Les résultats générés par une simulation sont enregistrés dans une base de données SQLite comportant plusieurs tables. Pour cette étude, la table qui nous intéresse est la table MESECT, dans laquelle figure, pour l'ensemble du temps de simulation (c'est-à-dire sur 1 h), le nombre de véhicules (champ *count*) de chaque type (champ *sid*), sur chaque segment de route (champ *oid*), agrégé sur un certain intervalle de temps (ici 10 minutes). Le champ *sid* comprend comme valeurs les types de véhicules modélisés selon les matrices O-D, ainsi que les bus de la STM renseignés dans le modèle. Les volumes des véhicules pour l'heure de pointe identifiés comme des voitures, camions et bus sont donc disponibles en sortie du modèle AIMSUN. Ils sont utilisés

pour être extrapolés à d'autres moments de la journée et sur d'autres journées de l'année à l'aide de facteurs d'ajustement.

La composition de la flotte de véhicules simulée par le modèle AIMSUN a été comparée à la flotte des données des véhicules en circulation de 2013 de la SAAQ et aux comptages aux intersections de 2013 des Données ouvertes afin de vérifier que la flotte simulée est représentative de la flotte réelle. La comparaison des parcs de véhicules selon les sources de données est disponible dans l'annexe IV. Pour cette vérification, les données de la SAAQ ont été filtrées pour la région administrative de Montréal. De plus, toutes les intersections relevées en 2013 sur l'île de Montréal sont prises en compte pour les données des comptages aux intersections (SAAQ, 2023b; Ville de Montréal, 2025a).

2.1.2 Données de comptages

Des relevés de circulation sont utilisés pour déterminer les facteurs d'ajustement de la circulation. Les facteurs d'ajustement sont calculés pour différents sites et permettent de représenter la variation de la circulation selon l'heure, le jour et le mois.

2.1.2.1 Sites

Pour calculer des facteurs d'ajustement de la circulation, il est nécessaire de disposer de comptages routiers effectués sur une période suffisante, a minima sur 24 h et sur 84 jours de manière à couvrir les sept jours de la semaine (lundi, mardi, mercredi, jeudi, vendredi, samedi et dimanche) sur 12 mois. L'idéal est de disposer de comptages permanents sur 365 jours sur une année pour avoir une estimation la plus représentative possible, mais cela nécessite plus de moyens. À Montréal, les jeux de données qui permettent de déterminer des facteurs d'ajustement sont les comptages à l'intersection Marcel-Laurin/Thimens entre mai 2015 et mai 2016 sur 84 jours, et les relevés des sites permanents sur les autoroutes gérées par le MTMD. Les données horaires des années calendaires 2013, 2015 et 2016 sont utilisées pour les sites permanents, comme le modèle AIMSUN est alimenté par l'enquête O-D de 2013 et que les comptages

disponibles à l’intersection Marcel-Laurin/Thimens ont été relevés en 2015 et 2016. Les sites permanents utilisés pour calculer les facteurs d’ajustement sont sélectionnés selon deux critères : 1) être dans l’arrondissement de Saint-Laurent ou desservir une autoroute de l’arrondissement ; 2) pour une année donnée, avoir au moins 80 % des relevés horaires disponibles sur le total des deux directions de circulation. Les sites permanents et années de comptage retenus pour déterminer les facteurs d’ajustement sont indiqués dans le tableau 2.1.

Les données de comptage sont également utilisées pour évaluer les DJMA et les débits horaires estimés. L’ensemble des sites de comptage retenus en fonction de leur utilisation sont indiqués sur la figure 2.3. Le nombre de sections de route comparables est limité par le fait qu’en sortie du modèle AIMSUN, certains segments de route ne comportent pas de véhicules, c’est-à-dire que la valeur du champ *count* est nulle. En effet, le raffinement du modèle et la manière dont les centroïdes sont connectés font que toutes les sections de route modélisées ne sont pas nécessairement empruntées par les véhicules durant la simulation. La méthode utilisée pour extrapoler temporellement les débits sur les sections non empruntées durant la simulation générera nécessairement un débit nul, quelle que soit la temporalité, ce qui n’est pas réaliste. Les sections de route non empruntées à l’issue de la modélisation sont donc exclues de l’extrapolation temporelle des débits et des évaluations. De plus, comme illustré sur la figure 2.2, les débuts et fins de section diffèrent entre le réseau modélisé dans AIMSUN et les tronçons définis dans le jeu de données du MTMD, ce qui complexifie l’association des identifiants entre les deux réseaux routiers. L’association a été faite au mieux visuellement. Les sections de route du modèle AIMSUN différencieront selon la valeur du volume de véhicules en sortie du modèle, ainsi que l’ensemble des sites de comptage de la circulation utilisés pour l’ensemble des étapes de la méthodologie sont indiqués sur la figure 2.3.

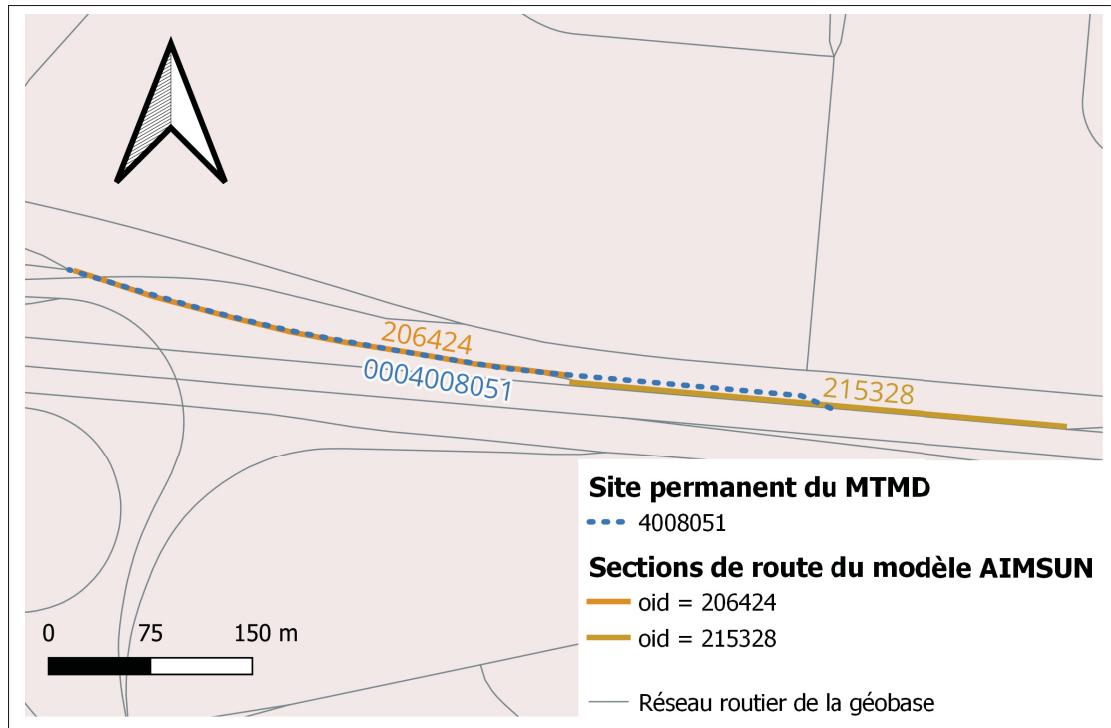


Figure 2.2 Exemple de différence de définition des sections de route entre le réseau routier du modèle AIMSUN et celui du MTMD

Tableau 2.1 Sites permanents retenus pour le calcul des facteurs d'ajustement

Identifiant de la section	Localisation	Année
1302450	au nord du pont d'étagement de Côte-Vertu	2013
1305000	extrémité nord du pont de la rivière des Prairies	2016
1519000	approche nord du pont Médéric-Martin	2016
4010000	à l'ouest du boulevard Décarie	2016

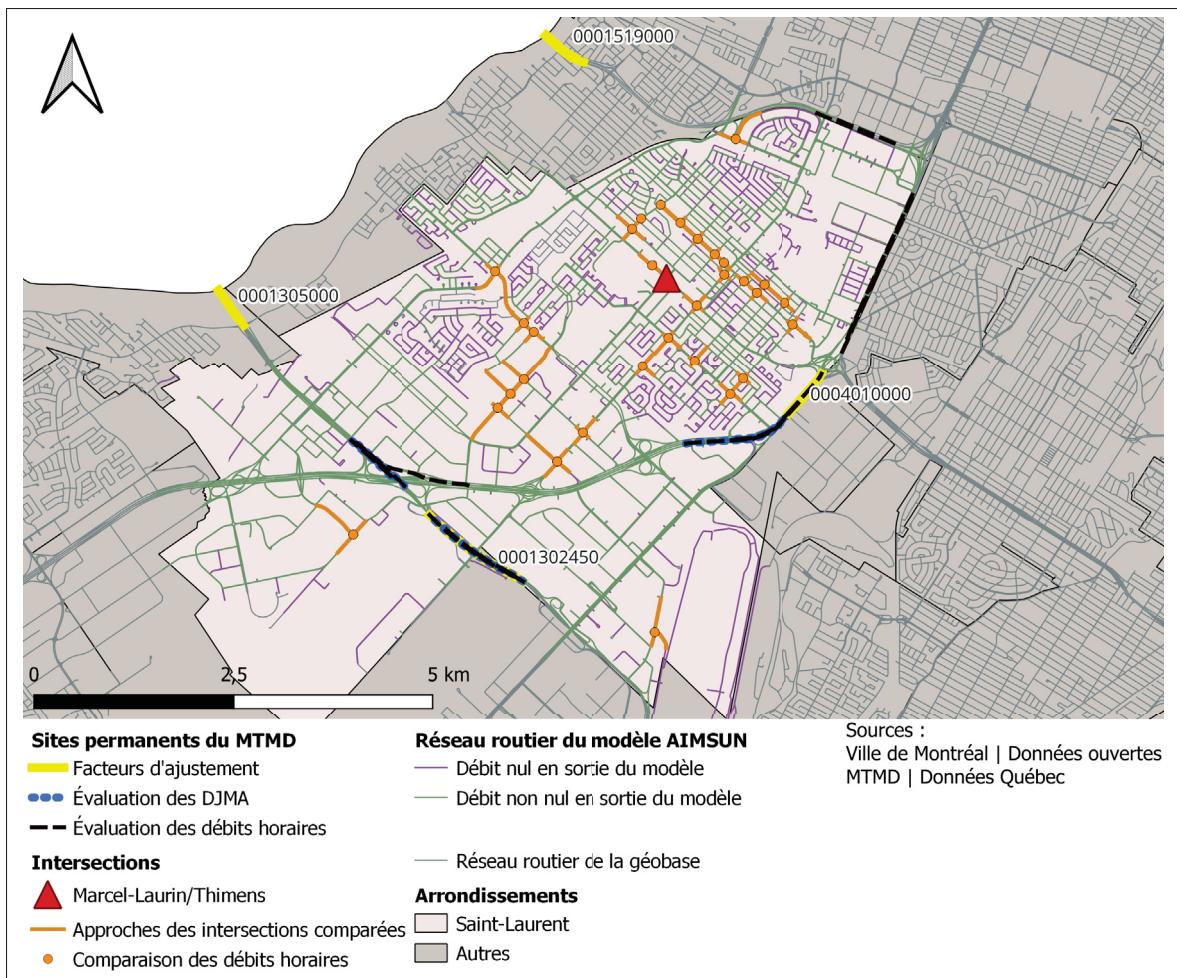


Figure 2.3 Sites de comptage retenus en fonction de leur utilisation et réseau routier du modèle AIMSUN

2.1.2.2 Facteurs d'ajustement

Les facteurs d'ajustement sont déterminés pour chaque source de données, chacune représentant des routes de classes différentes : une intersection d'arrondissement impliquant une artère principale et une collectrice avec l'intersection Marcel-Laurin/Thimens, et des autoroutes avec les sites permanents du MTMD. Les profils de circulation définis par les facteurs d'ajustement de ces deux localisations distinctes sont analysés pour vérifier s'ils diffèrent de manière importante ou non, afin d'appliquer les facteurs aux différents types de routes de manière adéquate.

L'intersection Marcel-Laurin/Thimens comportant quatre approches (nord, sud, est et ouest), les facteurs d'ajustement sont d'abord calculés pour chaque approche avant de déterminer la moyenne des quatre approches qui sera considérée comme le facteur à utiliser. Pour les sites permanents du MTMD, les facteurs d'ajustement sont déterminés pour chaque section d'autoroute retenue aux années calendaires 2015 et/ou 2016 sur le total des deux directions, avant de calculer la moyenne des facteurs de l'ensemble des segments autoroutiers, moyenne qui sera utilisée pour extrapoler les débits.

Comme dans les données des sites permanents des autoroutes, les données disponibles ne diffèrent pas les comptages de chaque type de véhicule, mais représentent l'ensemble des véhicules relevés, les facteurs d'ajustement déterminés pour le jeu des données du MTMD concernent l'ensemble des véhicules. En revanche, pour l'intersection Marcel-Laurin/Thimens, les comptages disponibles diffèrent les véhicules selon trois groupes : "autos", "bus" et "camions". Les facteurs d'ajustement issus des comptages sur l'intersection Marcel-Laurin/Thimens sont donc calculés pour chacun de ces trois types de véhicules. Deux types de facteurs d'ajustement sont déterminés : 1) des facteurs horaires permettant d'estimer à partir d'un débit de véhicules horaire un débit journalier (et inversement) ; 2) des facteurs mois-jours, pour calculer le DJMA à partir d'un débit journalier (et inversement).

Facteurs horaires

Les facteurs horaires représentent la proportion de véhicules roulant durant une heure particulière par rapport au volume journalier. Ils sont compris entre 0 et 1 et 24 facteurs horaires différents sont calculés pour les 24 h d'une journée. Pour prendre en compte la variabilité du jour de la semaine, les facteurs appelés "jour-heure" sont déterminés selon l'équation 2.1 en divisant le débit horaire moyen d'une journée donnée par la somme des débits horaires moyens de cette même journée (FHWA, 2018).

$$f^{j,h} = \frac{VOL_{moy,annuel}^{j,h}}{\sum_{i=0}^{23} VOL_{moy,annuel,i}^{j,h}} \quad (2.1)$$

Avec :

- j : jour de la semaine, $j \in \{\text{dimanche}, \text{lundi}, \text{mardi}, \text{mercredi}, \text{jeudi}, \text{vendredi}, \text{samedi}\}$;
- h : heure de la journée, nombre entier compris entre 0 et 23 et tel que $h = 2$ signifie l'heure entre 2 et 3 h du matin ;
- $f^{j,h}$: facteur jour-heure pour le jour j et l'heure h ;
- $VOL_{\text{moy,annuel}}^{j,h}$ (*véhicules*) : moyenne des volumes de véhicules relevés les jours j aux heures h pour une année donnée.

Des facteurs horaires sont également calculés en n'utilisant que les volumes de véhicules relevés les jours de semaines entre septembre et décembre (mois de collecte de l'enquête O-D), selon l'équation 2.2. Ils serviront à extrapoler les volumes de l'heure de pointe du matin en sortie du modèle AIMSUN.

$$f_{\text{automne,jours ouvrables}}^h = \frac{VOL_{\text{moy,automne,jours ouvrables}}^h}{\sum_{i=0}^{23} VOL_{\text{moy,automne,jours ouvrables},i}^h} \quad (2.2)$$

Avec :

- $f_{\text{automne,jours ouvrables}}^h$: facteur horaire pour l'heure h pour les jours ouvrables d'automne (entre septembre et décembre inclus) ;
- $VOL_{\text{moy,automne,jours ouvrables}}^h$ (*véhicules*) : moyenne des volumes de véhicules relevés sur l'heure h les jours ouvrables en automne.

Les débits estimés en utilisant des facteurs d'ajustement visent à dépeindre la circulation d'une journée représentative, et donc ne pas représenter des journées anormales comme des jours fériés ou des travaux qui peuvent affecter la circulation. Ainsi, les journées non représentatives devraient être exclues du calcul des facteurs d'ajustement. De plus, les collectes devraient être évitées en début et en fin de mois pour s'assurer de représenter une semaine typique du mois concerné. Compte tenu des données disponibles limitées pour l'intersection Marcel-Laurin/Thimens, tous les jours relevés sont pris en compte sans exclure les possibles jours fériés relevés ou les jours où des travaux auraient pu être menés. Pour les facteurs horaires des sites permanents du MTMD,

les relevés horaires utilisés proviennent de l'onglet "hre_pointes" des rapports annuels des sites permanents afin de connaître le jour et le mois pendant lesquels les différents volumes horaires ont été collectés. Les volumes indiqués dans cet onglet incluent donc toutes les journées collectées, y compris les journées qui pourraient ne pas être représentatives. L'accès aux rapports annuels est indiqué dans l'annexe I.

Facteurs mois-jours

Les facteurs mois-jours constituent le ratio entre un débit journalier d'un jour j et d'un mois m spécifiques et le DJMA. Quatre-vingt-quatre facteurs sont calculés, correspondant aux 7 jours de la semaine sur 12 mois. Ils sont déterminés selon la formule 2.3.

$$f^{m,j} = \frac{VOL_{moy}^{m,j}}{\text{Volume journalier moyen}} \quad (2.3)$$

Avec :

- $f^{m,h}$: facteur mois-jour pour le jour j et le mois m ;
- $VOL_{moy}^{m,j}$ (*véhicules*) : moyenne des volumes journaliers relevés les jours j pendant le mois m .

Le dénominateur de l'équation 2.3 est calculé différemment selon la source des données de comptage. Pour l'intersection Marcel-Laurin/Thimens, il correspond à la moyenne des volumes journaliers sur les 84 jours collectés. Il correspond ainsi à un débit journalier annuel moyen, mais sans l'aspect de représentativité d'une journée typique. Dans le jeu de données du MTMD, des débits journaliers moyens pour chaque jour de la semaine et chaque mois sont fournis (onglet "fact84" des rapports annuels des sites permanents). Ces débits excluent les journées non représentatives et comportent donc la notion de représentation d'une journée typique. Leurs valeurs sont donc utilisées pour calculer les facteurs mois-jours des autoroutes.

2.1.3 Extrapolation temporelle des débits

Les volumes de véhicules circulant à l'heure de pointe sur chaque section de route modélisée dans le modèle AIMSUN sont extrapolés temporellement à l'aide des facteurs d'ajustement calculés. Les DJMA sur chaque section de route sont d'abord estimés avant de déterminer les débits journaliers sur des jours de semaine et mois spécifiques et les débits horaires.

2.1.3.1 DJMA

Les DJMA de chaque segment de route pour une journée ouvrable d'automne sont estimés à l'aide de la formule 2.4 à partir des volumes de véhicule, à l'heure de pointe du matin ou de l'après-midi, issus du modèle AIMSUN.

$$DJMA_s = \frac{VOL_{AIMSUN,s}^{h=h_p}}{f_{automne,jours\ ouvrables}^{h=h_p} \cdot f_{automne,jours\ ouvrables}^{m,j}} \quad (2.4)$$

Avec :

- s : section de route ;
- h_p : heure de pointe, avec $h_p \in \{7, 16\}$;
- $DJMA_s$ (*véhicules/j*) : DJMA de la section de route s ;
- $VOL_{AIMSUN,s}^{h=h_p}$ (*véhicules*) : volume de véhicule à l'heure de pointe h_p de la section de route s en sortie du modèle AIMSUN ;
- $f_{automne,jours\ ouvrables}^{h=h_p}$: facteur horaire à l'heure de pointe h_p , déterminés pour les mois d'automne entre septembre et décembre inclus, et les jours ouvrables (de lundi à vendredi) ;
- $f_{moy,automne,jours\ ouvrables}^{m,j}$: facteur mois-jour moyen pour les mois d'automne et les jours ouvrables.

Comme les volumes en sortie de AIMSUN représentent une circulation aux heures de pointe du matin ou du soir pour une journée ouvrable (du lundi au vendredi) d'automne (entre septembre et décembre), le facteur mois-jour utilisé dans l'équation 2.4 est une moyenne des facteurs pour

la période considérée. En plus d'utiliser les valeurs moyennes, le calcul des débits extrapolés temporellement est aussi réalisé en utilisant les bornes minimales et maximales des facteurs sur les périodes considérées. En effet, comme les facteurs d'ajustement sont calculés sur un nombre limité de comptages, cela permet d'estimer une plage de valeurs à l'intérieur de laquelle les débits estimés pourraient se trouver. Les valeurs moyennes, minimales et maximales des facteurs d'ajustement mois-jour sont présentées dans le tableau 2.2. Des exemples de calcul sont présentés dans l'annexe V.

Tableau 2.2 Plages de valeur des facteurs mois-jours

Valeur	Intersection Marcel-Laurin/Thimens			Autoroutes du MTMD
	Automobiles	Bus	Camions	Tous les véhicules
Moyenne	1,117	1,308	1,337	1,066
Minimale	1,044	0,914	1,189	1,002
Maximale	1,198	1,556	1,616	1,138

2.1.3.2 Débits journaliers et horaires

Une fois les DJMA estimés sur chaque segment de route, le calcul inverse est effectué en utilisant les 84 facteurs mois-jours sur chaque DJMA pour estimer dans un premier temps les débits journaliers sur les 84 jours, c'est-à-dire pour les 7 jours de la semaine sur 12 mois, en appliquant l'équation 2.5.

$$Q_s^{m,j} = DJMA_s \times f^{m,j} \quad (2.5)$$

Avec :

- $Q_s^{m,j}$ (*véhicules/j*) : débit journalier pour le mois m et le jour j de la section de route s ;
- $DJMA_s$ (*véhicules/j*) : DJMA de la section de route s ;

- $f^{m,j}$: facteur mois-jour pour le mois m et le jour j .

Les débits horaires sur les 24 h des 84 jours sont ensuite déterminés à l'aide de l'équation 2.6.

$$Q_s^{m,j,h} = Q_s^{m,j} \times f^{j,h} \quad (2.6)$$

Avec :

- $Q_s^{m,j,h}$ (*véhicules/h*) : débit horaire pour le mois m , le jour j et l'heure h de la section de route s ;
- $f^{j,h}$: facteur jour-heure pour le jour j et l'heure h .

Finalement, $24 \times 7 \times 12$ valeurs de débits horaires sont calculées pour les sections de route issues du modèle AIMSUN. Ces débits horaires représentent la circulation ayant lieu pour l'heure considérée pour un jour de semaine et un mois spécifiques et sont dépendants de la qualité des facteurs d'ajustement utilisés.

2.1.3.3 Mode d'application des facteurs d'ajustement

Pour rappel, les facteurs d'ajustement sont déterminés distinctement à partir de l'intersection Marcel-Laurin/Thimens et des sites permanents des autoroutes du MTMD. Les volumes extraits du modèle AIMSUN sur les sections d'autoroute sont extrapolés à l'aide des facteurs d'ajustement issus des données du MTMD, tandis que les volumes des autres types de routes sont extrapolés en utilisant les facteurs de l'intersection Marcel-Laurin/Thimens. Le modèle AIMSUN comporte une classification des segments de route, mais celle-ci est basée sur leur capacité et non sur une base administrative. À la place, la classification routière utilisée est celle de la géobase disponible sur la plateforme des Données ouvertes de la Ville de Montréal (<https://donnees.montreal.ca/dataset/geobase#keywords>). La classification est donnée par l'attribut "CLASSE" (Ville de Montréal, s.d.). Pour attribuer aux segments de route du réseau routier modélisé dans AIMSUN la classification de la géobase, le logiciel de Système d'information géographique (SIG) QGIS est utilisé en appliquant la fonctionnalité de jointure

spatiale avec l'outil "Joindre les attributs par localisation". Le champ "CLASSE" de la géobase et ses valeurs sont associés de cette manière à la table de données du réseau routier du modèle AIMSUN, exporté sous format SIG depuis AIMSUN. Le champ "CLASSE" des segments de route de la géobase qui intersectent géographiquement ceux du réseau routier du modèle AIMSUN est attribué aux segments routiers intersectés. L'association ainsi effectuée comporte des erreurs puisque le réseau routier de la géobase et celui modélisé dans AIMSUN ne se superposent pas, comme montré dans la figure 2.4. Les erreurs qui ont pu être identifiées ont été corrigées manuellement.

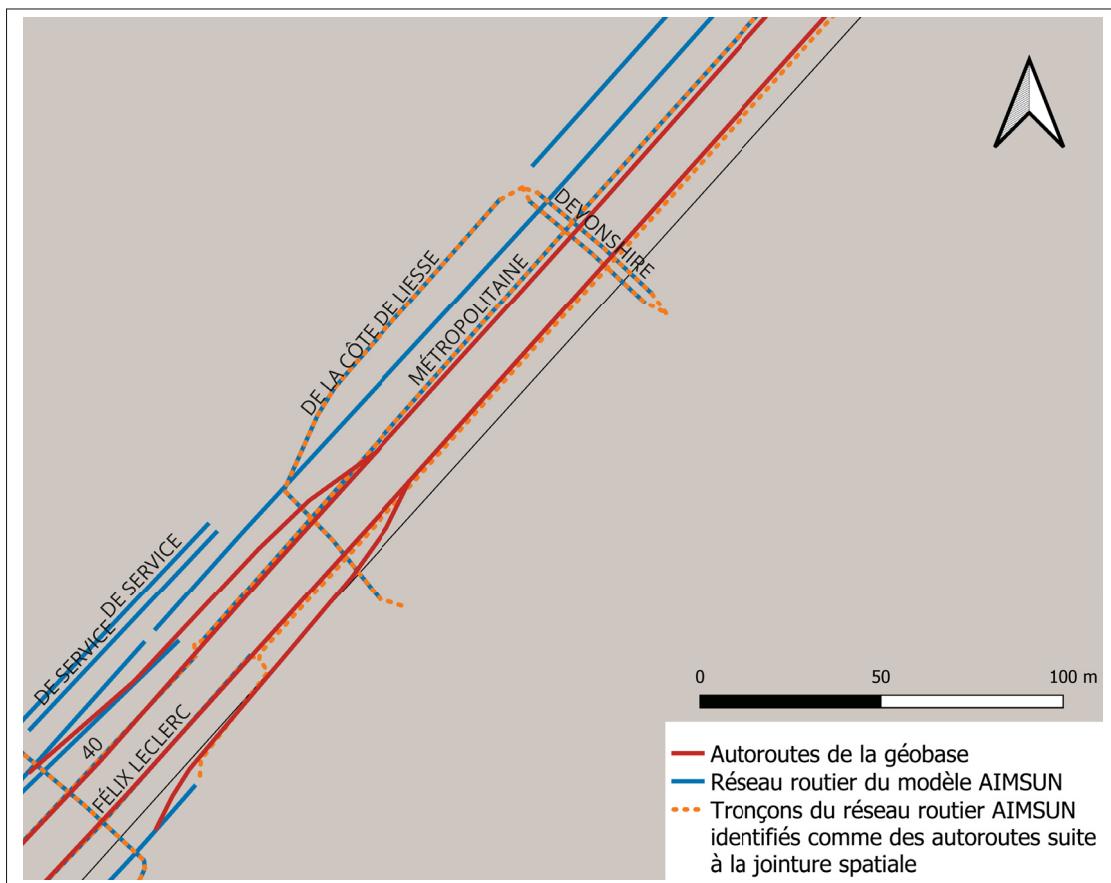


Figure 2.4 Extrait du réseau routier du modèle AIMSUN, des autoroutes de la géobase et de la jointure spatiale effectuée sur QGIS

De plus, les facteurs d'ajustement de l'intersection Marcel-Laurin/Thimens sont calculés pour les trois groupes de véhicules disponibles dans les données de comptage ("autos", "bus" et

"camions"), tandis que les facteurs d'ajustement issus des comptages des autoroutes du MTMD comprennent tous les types de véhicules. En sortie du modèle AIMSUN, les volumes de véhicules sur l'heure de pointe sont distingués selon les types de véhicules modélisés : voitures, bus et camions. Une limite est que les volumes identifiés comme des voitures comprennent les camions réguliers en plus des véhicules légers des particuliers et les véhicules légers commerciaux comme expliqué dans le chapitre 1 (section 1.4.1.2), et que lorsqu'on applique les facteurs d'ajustement de l'intersection Marcel-Laurin/Thimens, ce sont les facteurs associés aux "autos" qui sont utilisés. Les débits estimés des camions réguliers auront donc un profil de circulation similaire à celui des automobiles, ce qui pourrait être dérangeant. Cependant, en se fiant aux indications du guide de Miovision, certains véhicules considérés comme des camions réguliers au sens de la définition du modèle AIMSUN pourraient être dans le groupe "autos" des relevés de comptage, tandis que d'autres se retrouveraient dans le groupe "camions" des relevés. La classification des véhicules dans les comptages aux intersections ne correspondant pas aux définitions des véhicules modélisés dans AIMSUN, les facteurs d'ajustement de l'intersection Marcel-Laurin/Thimens sont appliqués comme expliqué dans la figure 2.5 pour faire concorder les types de véhicules au mieux lorsque cela est possible.

À noter que les relevés les plus récents des comptages aux intersections de la Ville de Montréal montrent que six groupes de véhicules sont présents (contre trois pour les données de 2015-2016), et ce, en distinguant les camions porteurs des camions articulés, qui s'apparenteraient aux camions réguliers et aux camions lourds respectivement. Par conséquent, dans le cadre d'une mise à jour de la méthodologie dans le futur, des facteurs d'ajustement plus appropriés pourront être appliqués de manière distincte aux volumes des camions réguliers et des camions lourds en sortie de AIMSUN, en séparant les volumes des camions réguliers des volumes des automobiles. Ceci peut être fait en calculant le pourcentage de camions réguliers dans la matrice O-D "voiture" à l'aide des sous-matrices des véhicules légers des particuliers, des véhicules légers commerciaux et des camions réguliers fournies par le MTMD au SUM. Les calculs des pourcentages des véhicules légers particuliers, des véhicules légers commerciaux et des camions réguliers au sein de la matrice "voiture" ont d'ailleurs été réalisés dans le cadre du module de quantification des

émissions de gaz à effet de serre à la section 2.2 dans le but d'appliquer les données liées aux émissions de GES de manière adéquate selon les types de véhicules.

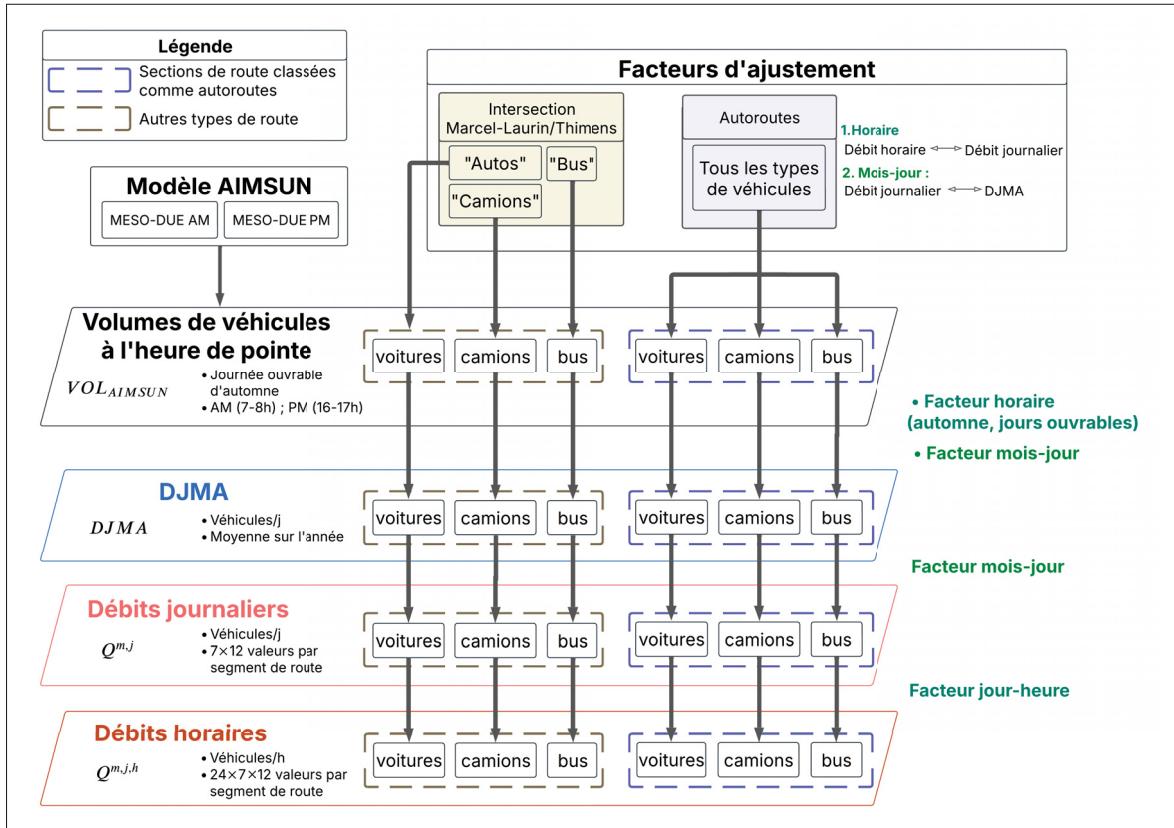


Figure 2.5 Application des facteurs d'ajustement aux débits routiers

2.1.4 Évaluation de l'estimation des débits

Les débits estimés — DJMA et débits horaires — sont comparés respectivement à des DJMA calculés par le MTMD sur les autoroutes dont la gestion incombe au MTMD, et aux comptages horaires des sites permanents du MTMD et aux comptages aux intersections. Les débits issus des relevés de comptage sont considérés comme étant les valeurs réelles. La qualité des débits estimés est évaluée au moyen du calcul du R^2 , du MAPE et des écarts relatifs, calculés comme indiqué respectivement dans les formules 2.7, 2.8 et 2.9.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.7)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \times 100 \quad (2.8)$$

$$\text{écart relatif}_i (\%) = \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \times 100 \quad (2.9)$$

Avec :

- n : le nombre de sections de route comparées ;
- y_i : la valeur réelle de la section de route i ;
- \hat{y}_i : la valeur estimée de la section de route i ;
- \bar{y} : la moyenne des valeurs réelles.

Comme expliqué dans la section 2.1.3.1, plusieurs valeurs de débits sont calculées en fonction du facteur mois-jour utilisé pour estimer le DJMA (valeurs moyenne, minimale et maximale du facteur mois-jour sur la période d'automne les jours de semaine). La valeur estimée y_i utilisée correspond au débit estimé à partir de la valeur moyenne du facteur mois-jour.

L'utilisation du score R^2 permet d'avoir une mesure de la variance capturée par l'estimation, tandis que le MAPE indique l'erreur entre les débits estimés et ceux réels. Concrètement, plus la valeur du R^2 est proche de 1, meilleure est l'estimation en termes de capture de la variance des données. Pour le MAPE, plus sa valeur est faible et meilleure est l'estimation pour prédire des débits proches des débits observés sur le terrain. Lewis (1982) a élaboré un tableau (cf. tableau 2.3) permettant d'interpréter la valeur des MAPE pour juger la qualité d'une estimation (Lewis, 1982).

Tableau 2.3 Interprétation des valeurs de MAPE
Tiré de Lewis (1982, p. 40)

MAPE (%)	Interprétation
<10	Estimation très précise
10-20	Bonne estimation
20-50	Estimation raisonnable
>50	Estimation inexacte

2.1.4.1 Évaluation des DJMA

Les DJMA estimés reposent sur un volume de véhicules établi pour une seule heure à savoir l'heure de pointe. Or, la durée commune des comptages courts utilisés pour estimer un DJMA avec des facteurs d'ajustement est de 24 ou 48 h, les durées les plus longues fournissant des DJMA plus précis (FHWA, 2022). Évaluer les DJMA estimés avec la méthode développée est donc nécessaire. Pour cela, ils sont comparés aux DJMA de 2013, 2015 et 2016 calculés par le MTMD à partir des sites permanents des autoroutes de l'arrondissement de Saint-Laurent (Ministère des Transports et de la Mobilité durable, 2024a). Les DJMA calculés par le MTMD aux sites permanents sont en effet déterminés de manière plus fiable d'un point de vue statistique puisqu'ils se basent sur des relevés continus. Ils sont renseignés dans le tableau 2.4. À chaque section de route identifiée par un identifiant du MTMD est associée une paire d'identifiants des sections AIMSUN comprenant les deux sens de circulation car les DJMA calculés par le MTMD se réfèrent aux deux sens de circulation, contrairement aux sections de route définies dans le réseau modélisé dans AIMSUN.

Tableau 2.4 DJMA calculés par le MTMD et pris comme valeurs vraies

D'après les données de Ministère des Transports et de la Mobilité durable (2024a)

Section de route		DJMA		
Paire d'oid	Identifiant MTMD	2013	2015	2016
(215496 ; 181369)	4009500	114 000	106 000	107 000
(215413 ; 215418)	1302450	94 000	95 000	95 000
(147464 ; 147342)	1303500	93 000	85 000	84 000

Les DJMA fournis par le MTMD dans les documents officiels sont arrondis selon ces 3 règles : 1) si le DJMA est inférieur à 2 500, alors il est arrondi au 10 le plus proche ; 2) si le DJMA est compris entre 2 500 et 25 000, alors il est arrondi au 100 le plus proche ; 3) si le DJMA est supérieur à 25 000, alors il est arrondi au 1 000 le plus proche (MTMD, communication personnelle, 2024). Dans le cadre de la comparaison uniquement, les DJMA estimés sont également arrondis selon ces règles.

2.1.4.2 Évaluation des débits horaires

Les débits horaires estimés sont comparés à deux jeux de données servant de valeurs de référence (valeurs "réelles") : les comptages de 2013, 2015 et 2016 des sites permanents du MTMD, et les comptages de 2013 aux intersections de la plateforme des Données ouvertes de la Ville de Montréal. Comme les débits estimés avec la méthodologie développée dans le cadre de ce mémoire représentent la circulation d'un jour de semaine typique d'un mois spécifique, les débits pris comme références sont moyennés pour correspondre au débit horaire moyen d'un jour et d'un mois spécifiques. Par exemple, le débit horaire estimé pour un lundi de janvier entre 10 et 11 h est comparé à la moyenne des débits relevés entre 10 et 11 h les lundis du mois de janvier. Cette opération est possible pour les comptages horaires des sites permanents du MTMD comme ils sont effectués de manière continue. En revanche, cela est impossible pour

les comptages aux intersections puisqu'ils sont réalisés sporadiquement sur un nombre très limité de jours dans l'année. La comparaison des débits horaires estimés avec les comptages aux intersections se fait donc en utilisant les débits horaires relevés sur un nombre restreint de dates particulières. Cet aspect est à prendre en compte dans l'analyse des résultats de la comparaison avec les comptages aux intersections puisqu'il se peut que des événements particuliers affectant la circulation adviennent aux dates relevées (tempête de neige, travaux, jours fériés, etc.), effet qui est atténué en revanche en calculant la moyenne avec des comptages relevés aux mêmes autres jours de semaine du même mois. Pour cette raison, les R^2 et MAPE calculés en prenant comme valeur de référence les données de comptage aux intersections ne sont pas présentés dans les résultats.

Les scores R^2 et MAPE sont calculés pour les débits issus des simulations MESO DUE AM et MESO DUE PM selon trois configurations différentes, en comparant les débits estimés : 1) pour les heures du matin seulement ; 2) pour les heures de l'après-midi seulement ; 3) pour les 24 h de la journée. Le but avec l'étude de ces trois configurations est de déterminer si une simulation de départ est à privilégier pour estimer une certaine partie de la journée.

Dans les jeux de données des sites permanents du MTMD, les débits horaires sont disponibles pour chaque sens de circulation, contrairement aux DJMA qui sont calculés par le MTMD pour la somme des deux sens de circulation du tronçon routier considéré. Ainsi, les débits horaires sont comparés avec les relevés horaires du MTMD pour chaque section autoroutière. Le tableau 2.5 indique l'association faite entre les sections du réseau routier AIMSUN et celles du réseau routier du MTMD. La colonne "Voie", comme intitulée dans les jeux de données du MTMD, correspond aux directions de la chaussée. Une chaussée dont l'attribut "Voie" vaut 11 a une direction d'ouest en est ou du sud vers le nord, tandis que la valeur 12 signifie la direction inverse. Les relevés horaires des sites permanents du MTMD se situent dans l'onglet "hre_pointes" des classeurs Excel des rapports annuels. L'accès à ces fichiers est indiqué dans l'annexe I.

Tableau 2.5 Association des sections de route du MTMD à celles du réseau routier AIMSUN

Identifiant du MTMD et année des comptages	Voie	oid
1302450 (2013 ; 2015 ; 2016)	11	215413
1302450 (2013 ; 2015 ; 2016)	12	215418
1303500 (2015 ; 2016)	11	147464
1303500 (2015 ; 2016)	12	147342
1518020 (2013 ; 2016)	12	208733
1518020 (2013 ; 2016)	12	215356
4008051 (2015 ; 2016)	11	206424
4008052 (2015 ; 2016)	11	147341
4009500 (2013 ; 2015)	11	215496
4009500 (2013 ; 2015)	12	181369
4010000 (2013 ; 2015 ; 2016)	12	518271
4011500 (2015)	12	208942
4011800 (2015)	12	215321
4012000 (2015 ; 2016)	12	7744163
4012000 (2015 ; 2016)	12	7744166
4012000 (2015 ; 2016)	12	193564

Pour la comparaison avec les données des comptages aux intersections, les localisations des intersections utilisées sont indiquées sur la figure 2.3. Les débits estimés pour les sections de route du modèle AIMSUN sont comparés aux comptages des approches entrantes des intersections. Plus de détails sur la procédure utilisée pour associer les sections de route aux approches des intersections sont présents dans l'annexe VI.

2.1.5 Véhicules-kilomètres parcourus

Les débits estimés, c'est-à-dire les DJMA, les débits journaliers et les débits horaires sont utilisés pour calculer les VKT sur chaque section de route selon les équations 2.10, 2.11 et 2.12. Les VKT calculés à partir des DJMA servent à calculer les émissions selon une moyenne journalière sur une année afin d'avoir une résolution des émissions plus facilement comparable à celle des inventaires annuels traditionnellement réalisés par les municipalités. Les longueurs des sections de route sont issues du modèle AIMSUN.

$$VKT_{DJMA,s} = DJMA_s \times L_s \quad (2.10)$$

Avec :

- $VKT_{DJMA,s}$ (*véhicules – km/j*) : VKT journalier moyen pour l'année de la section de route s ;
- $DJMA_s$ (*véhicules/j*) : DJMA de la section de route s ;
- L_s (*km*) : longueur de la section de route s .

$$VKT_{j,s}^{m,j} = Q_s^{m,j} \times L_s \quad (2.11)$$

Avec :

- $VKT_{j,s}^{m,j}$ (*véhicules – km/j*) : VKT journalier pour le mois m et le jour j de la section de route s ;
- $Q_s^{m,j}$ (*véhicules/j*) : Débit journalier pour le mois m et le jour j de la section de route s .

$$VKT_{h,s}^{m,j,h} = Q_s^{m,j,h} \times L_s \quad (2.12)$$

Avec :

- $VKT_{h,s}^{m,j,h}$ (*véhicules – km/h*) : VKT horaire pour le mois m , le jour j et l'heure h de la section de route s ;
- $Q_s^{m,j,h}$ (*véhicules/h*) : Débit horaire pour le mois m , le jour j et l'heure h de la section de route s .

2.2 Estimation des émissions de GES à haute résolution spatiale et temporelle

Comme les émissions de GES dépendent, entre autres, du type de véhicule et que les débits et VKT estimés qui découlent de la circulation de la matrice d'AIMSUN "voiture" comprend des véhicules légers des particuliers (notés vlp), des véhicules légers commerciaux (notés vlc) et des camions réguliers (notés vrg), les VKT de ces trois types de véhicules sont d'abord estimés à partir des VKT issus des déplacements de la matrice "voiture" au moyen de l'équation 2.13. Le ratio de chacun des trois types de véhicules au sein de la matrice "voiture" sont calculés à partir des matrices O-D des vlp, vlc et vrg fournies par le MTMD au SUM avant que ce dernier n'agrège les trois matrices pour créer la matrice "voiture". Les ratios sont indiqués dans le tableau 2.6.

$$VKT_{s,v} = p_v \times VKT_{s,car} \quad (2.13)$$

Avec :

- s : section de route ;
- v : type de véhicule avec $v \in \{vlp, vlc, vrg\}$;
- $VKT_{s,v}$ (*véhicules – km/j ou /h*) : VKT de la section de route s des véhicules v ;
- p_v : proportion des véhicules v parmi les véhicules de la matrice "voiture" ;
- $VKT_{s,car}$ (*véhicules – km/j ou /h*) : VKT de la section s découlant des déplacements des véhicules de la matrice O-D "voiture".

Tableau 2.6 Pourcentage des types de véhicules au sein de la matrice O-D "voiture"

p_{vlp}	p_{vlc}	p_{vrg}
0,88	0,09	0,03

Les émissions de GES pour chaque section de route sont ensuite calculées à partir des VKT estimés pour chaque section de route, dépendamment des types de véhicules et de carburant comme ces derniers influencent la quantité de GES générée. L'essence ou le diesel disponible à la pompe peut contenir une certaine part de biocarburant (de l'éthanol pour l'essence et du biodiesel pour le diesel). Or, les facteurs d'émission du CO₂ ne sont pas les mêmes entre les biocarburants et les carburants d'origine fossile. De plus, les émissions de CO₂ issues de la combustion de biocarburants sont dites biogéniques, et le MELCCFP recommande de les comptabiliser distinctement des émissions de CO₂ d'origine fossile. En effet, la combustion de la biomasse génère du CO₂ biogénique qui retourne dans la biomasse, contrairement au CO₂ libéré par la combustion d'hydrocarbures, qui lui avait été stocké pendant des millions d'années. Le CO₂ biogénique est associé au cycle court du carbone qui implique des processus se produisant sur des temps inférieurs au (Bourque & Université Laval, 2010). Les émissions de CO₂ issues de la combustion de biocarburants peuvent donc être considérées comme carboneutres. En revanche, les émissions de CH₄ et de N₂O issues de la combustion de la biomasse ne sont pas biogéniques et sont comptabilisées avec les émissions d'origine fossile. Il est cependant important de noter que la qualification "carboneutre" n'est applicable qu'en cas de gestion durable de la biomasse, et non en cas de déforestation (MELCCFP, 2025). Les émissions de GES excluent les émissions de CO₂ biogéniques et ne concernent donc que les émissions d'origine fossiles. Elles sont calculées selon la formule 2.14.

$$GES_s = 10^{-6} \sum_v \sum_c f_c^{th} \cdot p_{v,c} \cdot VKT_{s,v} \cdot C_{v,c} \sum_g (1 - p_{c,g}^{bio}) \cdot FE_{v,c,g} \cdot PRG_g \quad (2.14)$$

Avec :

- s : section de route s ;
- v : type de véhicule avec $v \in \{vlp, vlc, vrg, vlo, bus\}$, vlo représentant les camions lourds ;
- c : type de carburant (essence, diesel, hybride, hybride branchable, gaz naturel, propane) ;
- g : gaz à effet de serre avec $g \in \{CO_2, CH_4, N_2O\}$;
- $GES_s(t \text{ éq. } CO_2/j \text{ ou } /h)$: émissions de GES de la section de route s
- f_c^{th} : facteur correctif permettant de prendre en compte la distance parcourue en mode thermique. $f_c^{th} = (1 - UF)$ pour les véhicules hybrides rechargeables avec $UF = 0,54$ et $f_c^{th} = 0$ sinon ;
- $p_{v,c}$: pourcentage de véhicules avec le type de carburant c parmi les véhicules de type v ;
- $VKT_{s,v}$ ($véhicules - km/j$ ou $/h$) : VKT des véhicules de type v sur la section de route s ;
- $C_{v,c}$ (L/km) : consommation de carburant des véhicules de type v qui rouent avec le carburant c ;
- $p_{c,g}^{bio}$: part de biocarburant dans le carburant c , $p_{c,g}^{bio} = 0$ lorsque $g \in \{CH_4, N_2O\}$;
- $FE_{v,c,g}$ (g/L) : facteur d'émission du GES g des véhicules de type v qui rouent avec le carburant c ;
- PRG_g : PRG du GES g .

Pour prendre en compte le fait qu'un parcours effectué par un véhicule hybride branchable est réalisé en mode thermique ou en mode électrique, et donc que sur la distance où le véhicule roule en mode électrique aucune émission de GES n'a lieu, un facteur de correction f_c^{th} est appliqué à l'équation 2.14 dans le cas des véhicules hybrides branchables. Ce facteur de correction correspond au ratio entre le nombre de kilomètres parcourus en mode thermique sur le nombre total de kilomètres parcourus. Dans la littérature, on trouve comme grandeur le facteur d'utilité (noté UF pour *utility factor*), qui correspond au ratio entre le nombre de kilomètres parcourus en mode électrique et le nombre total de kilomètres parcourus. Ainsi, $f_{th} = (1 - UF)$. La valeur retenue pour l'UF est tirée du tableau 4 de Plötz et al. (2020) où la consommation de carburant de véhicules hybrides branchables en Chine, Europe et Amérique du Nord a été étudiée dans des conditions réelles. Le calcul de l'UF réalisé dans Plötz et al. (2020) se base sur le kilométrage

effectué en mode électrique et thermique à partir de données d'enquête réalisées auprès d'usagers. L'UF prend ainsi en compte le niveau de charge effectif et donc le comportement des usagers quant à la fréquence de chargement de leur véhicule. Aux États-Unis, la valeur moyenne de l'UF qui en a été déduite est de 54 % (Plötz, Moll, Bieker, Mock & Li, 2020).

À défaut de connaître les types de carburants utilisés par les véhicules pour une section de route donnée, on suppose que la proportion de véhicules qui utilise un certain type de carburant, pour un type de véhicule v donnée, est la même quel que soit le segment routier. Ainsi, les mêmes $p_{v,c}$ sont utilisés quelle que soit la section de route. La composition du parc de véhicules, les consommations de carburant et les facteurs d'émission utilisés sont explicités dans les sections suivantes. Les PRG employés sont ceux de l'AR6 du GIEC indiqués dans le tableau 1.1. Le PRG utilisé pour le méthane est celui noté comme "non-fossile".

Les sources de données utilisées pour la composition du parc de véhicules, les consommations de carburant et les facteurs d'émission présentent une hétérogénéité dans la définition des types de véhicules. En effet, les définitions des types de véhicules sont généralement dépendantes du poids du véhicule et se basent sur des seuils différents, tandis que les véhicules modélisés dans AIMSUN sont discriminés selon leur longueur. Ces dissemblances nécessitent de faire des choix pour associer les types de véhicules entre les jeux de données et ainsi appliquer les données adéquatement aux VKT calculés. L'annexe VII résume les différentes définitions selon la source des données.

La densité des émissions (en t éq. CO₂/km/j ou /h) est également calculée sur chaque section de route en divisant par la longueur de la section de route considérée les émissions estimées à partir de l'équation 2.14. En effet, normaliser les émissions par la longueur des segments routiers permet d'identifier les routes très émettrices en raison d'un haut volume de circulation.

2.2.1 Parc de véhicules

La composition du parc de véhicules, c'est-à-dire les pourcentages de véhicules avec le type de carburant c parmi les véhicules de type v notés $p_{v,c}$ dans l'équation 2.14, est tirée du jeu

de données des véhicules en circulation de la SAAQ (SAAQ, 2020). Comme les données de la SAAQ qui précèdent 2017 n'incluent pas le type de carburant, le jeu de données de 2017 est utilisé en excluant les véhicules dont l'année du modèle est postérieure à 2013. Les données sont filtrées pour les véhicules immatriculés dans la région administrative de Montréal, excepté pour les camions où aucun filtrage régional n'est appliqué. On considère en effet que la plupart des camions circulant dans l'arrondissement de Saint-Laurent proviennent de l'extérieur de Montréal et sont très probablement immatriculés en dehors de Montréal. De plus, les modèles des camions immatriculés dans la région de Montréal seulement n'incluent pas de camions porteurs ou de camions tracteurs mais seulement des camionnettes, contrairement aux modèles immatriculés dans la province, justifiant le choix fait. Les types de véhicules des données de la SAAQ (attribut "CLAS") sont assimilés aux types de véhicules v de l'étude selon le tableau 2.7. L'attribut "CLAS" dans les données de la SAAQ est un code qui identifie le type de véhicule et son utilisation. À noter que la différenciation entre les véhicules légers et les camions se fait notamment selon la masse des véhicules, contrairement aux véhicules modélisés dans AIMSUN qui sont discriminés selon leur longueur. Plus de détails sur les définitions associées aux types de véhicules selon les jeux de données sont disponibles dans l'annexe VII. Pour les autobus, comme ceux modélisés dans AIMSUN correspondent au bus de la STM, la composition de la flotte de la STM de 2013 est utilisée, en supposant que la composition de la flotte des bus de la STM pour l'ensemble de Montréal est représentative de celle des bus circulant dans l'arrondissement de Saint-Laurent. En 2013, le parc de bus de la STM est composé de 1730 bus, dont 8 à propulsion diesel-électrique (STM, 2014). Le tableau 2.8 donne les valeurs de $p_{v,c}$ utilisées.

Tableau 2.7 Association des types de véhicules AIMSUN à ceux des données de la SAAQ

Type de véhicule v	Attribut "CLAS"
Véhicule léger particulier (vlp)	PAU : Automobile ou camion léger, utilisation de promenade
Véhicule léger commercial (vlc)	CAU : Automobile ou camion léger, utilisation institutionnelle, professionnelle ou commerciale
Camion régulier (vrg)	BCA : Camion ou tracteur routier, utilisation institutionnelle, professionnelle ou commerciale
Camion lourd (vlo)	BCA : Camion ou tracteur routier, utilisation institutionnelle, professionnelle ou commerciale

Tableau 2.8 Pourcentages de véhicules avec le type de carburant c
 parmi les véhicules de type v

D'après les données de SAAQ (2020) et STM (2014, p. 5)

Type de Véhicule	Acronyme	Type de carburant	$p_{v,c} (%)$
Véhicule léger particulier	vlp	Essence	98,25
		Diesel	0,87
		Hybride	0,81
		Électricité	0,02
		Hybride branchable	0,03
		Gaz naturel	0,02
		Propane	0,01
Véhicule léger commercial	vlc	Essence	92,89
		Diesel	5,53
		Hybride	1,18
		Électricité	0,08
		Hybride branchable	0,08
		Propane	0,22
		Gaz naturel	0,01
Camion régulier	vrg	Diesel	82,02
		Essence	16,75
		Propane	1,21
		Gaz naturel	0,02
		Hybride	0,01
		Électricité	0
Camion lourd	vlo	Diesel	82,02
		Essence	16,75
		Propane	1,21
		Gaz naturel	0,02
		Hybride	0,01
		Électricité	0
Bus	bus	Diesel	99,54
		Hybride	0,46

2.2.2 Consommation de carburant

Les consommations de carburant sont tirées de sources de données différentes en fonction des types de véhicules. L'outil de consommation de carburant adapté au parc montréalais de

Castells (2022) est utilisé de manière prioritaire pour les véhicules légers comme il ne concerne que ce type de véhicule (Castells, 2022). Les consommations de carburant des camions et des bus sont en grande majorité à l'échelle provinciale ou nationale.

2.2.2.1 Véhicules légers

Les consommations de carburant des véhicules légers des particuliers et celles des véhicules légers commerciaux sont extraites de l'outil de consommation de carburant adapté au parc montréalais (Castells, 2022). Les données importées en entrée de l'outil sont les cotes de consommation de carburant des modèles de véhicules thermiques datant de 1995 à 2014 et celles des véhicules hybrides électriques rechargeables des modèles de 2012 à 2024 de RNCAN (RNCAN, 2024a,b). Le code a été modifié par rapport à sa version originale pour ne conserver que les modèles datant de 2013 ou d'une année antérieure. Comme l'étude se limite au scope 1 et donc que les émissions générées par la production d'électricité pour recharger les véhicules électriques ne sont pas prises en compte, les consommations énergétiques des véhicules électriques ne sont pas recherchées. Les consommations de carburant moyennes sont calculées en utilisant les cotes de consommation en ville. De la même manière que pour déterminer la composition du parc, les véhicules légers particuliers (vlp) sont assimilés aux véhicules classés comme des véhicules de promenade ("CLASS" = "PAU") et les véhicules commerciaux (vlc) sont associés aux véhicules institutionnels, professionnels ou commerciaux ("CLASS" = "CAU") dans les données de la SAAQ.

La fusion des données de RNCAN et de la SAAQ avec l'outil de Castells (2022) permet d'estimer les consommations des véhicules immatriculés dans la région administrative de Montréal, pour les véhicules roulant à l'essence et au diesel, ainsi que pour les véhicules hybrides et hybrides rechargeables. En revanche, pour les véhicules légers roulant au gaz naturel ou au propane, les consommations sont tirées de CURBv2.1 (données nationales). Les consommations moyennes pour chaque combinaison (type de véhicule v , type de carburant c) sont indiquées dans le tableau 2.9.

Tableau 2.9 Consommations de carburant des véhicules légers retenues pour l'étude

Type de véhicule	Type de carburant	Consommation de carburant (L/100 km)	Échelle géographique	Source
Véhicule léger particulier (vlp)	Essence	11,24	Montréal	(The World Bank, 2016)
	Diesel	8,68	Montréal	
	Hybride	7,39	Montréal	
	Hybride branchable	5,80	Montréal	
	Gaz naturel	11,11	Canada	
	Propane	14,24	Canada	
	Essence	13,86	Montréal	Outil de Castells (2022)
Véhicule léger commercial (vlc)	Diesel	9,30	Montréal	(The World Bank, 2016)
	Hybride	8,73	Montréal	
	Hybride branchable	5,80	Montréal	
	Propane	14,24	Canada	
	Gaz naturel	11,11	Canada	Outil de Castells (2022)

2.2.2.2 Camions et bus

Le tableau 2.10 synthétise les données de consommation de carburant utilisées pour les camions et les bus. Les données des camions sont à l'échelle provinciale si possible ou nationale à partir de données de RNCAN et de l'outil CURBv2.1 (RNCAN, 2024c, 2011; The World Bank, 2016). Encore une fois, les appellations des différents types de véhicules et leurs définitions diffèrent selon les bases de données et certaines approximations ont dû être faites. Les consommations de carburant associées aux camions hybrides sont supposées être équivalentes à celles des camions à essence traditionnels, menant à une surestimation, mais minime au vu de la taille du parc des camions hybrides. Pour les bus, les consommations de carburant sont tirées d'une étude portant sur la comparaison entre des bus à propulsion hybride diesel-électrique et des bus à propulsion diesel standard, à laquelle la STM a participé (Transports Canada, 2009).

Tableau 2.10 Consommations de carburant des camions et des bus retenues pour l'étude

Type de véhicule	Type de carburant	Consommation de carburant (L/100 km)	Échelle géographique	Source
Camion régulier (vrg)	Diesel	22,10	Québec	(RNCAN, 2024b)
	Essence	22,30	Québec	
	Propane	34,19	Canada	(The World Bank, 2016)
	Gaz naturel	25,38	Canada	
	Hybride	22,30		Hypothèse : même valeur que (vrg, essence)
Camion lourd (vlo)	Diesel	31,30	Québec	(RNCAN, 2024b)
	Essence	79,30	Canada	(RNCAN, 2011)
	Propane	80,86		Hypothèse : même valeur que (bus, propane)
	Gaz naturel	60,00	Canada	(The World Bank, 2016)
	Hybride	79,30		Hypothèse : même valeur que (vlo, essence)
Bus (bus)	Diesel	65,00	Montréal	(Transports Canada, 2009)
	Hybride	45,00	Montréal	

2.2.3 Composition du carburant

Les parts de biocarburant p_{c,CO_2}^{bio} sont tirées des données recueillies sous le Règlement sur les carburants renouvelables de ECCC pour 2013-2014 (ECCC, 2023). Elles valent 7 % pour l'éthanol dans l'essence et 2 % pour le biodiesel dans le diesel. Elles représentent la teneur moyenne en biocarburant en pourcentage du volume des stocks nationaux. On suppose que les véhicules roulant à l'essence et au diesel qui circulent dans l'arrondissement de Saint-Laurent s'approvisionnent tous avec du carburant respectant ces teneurs. Pour rappel, les véhicules hybrides et hybrides rechargeables sont considérés comme roulant tous à l'essence.

2.2.4 Facteurs d'émission

Les facteurs d'émission retenus pour l'étude proviennent de ECCC et sont tirés du tableau A6.1-15 de l'inventaire national du Canada de 2022 (ECCC, 2024b). Les taux d'émission de CH₄ et de N₂O dépendent de la technologie antipollution employée. Dans le tableau de ECCC (2024b), les facteurs d'émission du CH₄ et du N₂O sont ainsi déclinés selon plusieurs niveaux, relatifs au *Règlement sur les émissions des véhicules routiers et de leurs moteurs* (Association canadienne des constructeurs de véhicules, s.d.; Gouvernement du Canada, 2025). Dans le cadre de l'étude, il est supposé que le parc associé à un même type de véhicule v et de carburant c présente uniformément le même niveau réglementaire pour des fins de simplification. Le niveau choisi est le niveau 2 car il s'applique aux modèles fabriqués entre 2004 et 2016, période la plus représentée dans les années des modèles immatriculés en 2013 dans la région administrative de Montréal (SAAQ, 2023b). Le tableau 2.11 présente les facteurs d'émission utilisés dans la présente étude.

Tableau 2.11 Facteurs d'émission retenus
D'après les données de ECCC (2024b, p. 298)

		Facteur d'émission (g/L de combustible)		
Type de véhicule	Type de carburant	CO₂	CH₄	N₂O
Véhicule léger particulier (vlp)	Essence	2307,3	0,14	0,022
	Hybride	2307,3	0,14	0,022
	Diesel	2680,5	0,051	0,22
	Hybride branchable	2307,3	0,14	0,022
	Gaz naturel	1,9	0,0088	0,00006
	Propane	1515	0,64	0,028
Véhicule léger commercial (vlc)	Essence	2307,3	0,14	0,022
	Diesel	2680,5	0,051	0,22
	Hybride	2307,3	0,14	0,022
	Hybride branchable	2307,3	0,14	0,022
	Propane	1515	0,64	0,028
	Gaz naturel	1,9	0,0088	0,00006
Camion régulier (vrg)	Diesel	2680,5	0,11	0,151
	Essence	2307,3	0,29	0,047
	Propane	1515	0,64	0,028
	Gaz naturel	1,9	0,0088	0,00006
	Hybride	2307,3	0,29	0,047
Camion lourd (vlo)	Diesel	2680,5	0,11	0,151
	Essence	2307,3	0,29	0,047
	Propane	1515	0,64	0,028
	Gaz naturel	1,9	0,0088	0,00006
	Hybride	2307,3	0,29	0,047
Bus	Diesel	2680,5	0,11	0,151
	Hybride	2680,5	0,11	0,151

2.2.5 Évaluation de l'estimation des émissions

À ce jour, il n'existe pas d'inventaire de l'arrondissement de Saint-Laurent ou à Montréal avec une assez haute résolution spatio-temporelle pour comparer directement les émissions de GES estimées dans l'étude avec la littérature. En revanche, les émissions moyennes journalières sur l'année de l'ensemble des segments routiers calculées avec la méthode développée ici sont

comparées avec les émissions du transport routier de l'inventaire 2017 de l'arrondissement de Saint-Laurent (Boutin & Tacquet, 2018). L'inventaire de l'arrondissement de Saint-Laurent fournissant une valeur annuelle des émissions, la moyenne journalière pour 2017 des émissions découlant de l'inventaire de l'arrondissement est calculée avec l'équation 2.15. L'annexe VIII présente les données de l'inventaire utilisées pour la comparaison.

$$GES_{j,moy} = \frac{GES_{2017}}{365} \quad (2.15)$$

Avec :

- $GES_{j,moy}$ (*t éq. CO₂/j*) : émissions moyennes journalières découlant de l'inventaire 2017 de l'arrondissement de Saint-Laurent ;
- GES_{2017} (*t éq. CO₂/an*) : émissions du transport routier de l'inventaire 2017 de l'arrondissement de Saint-Laurent.

Comme l'inventaire 2017 de l'arrondissement de Saint-Laurent n'utilise pas les PRG de l'AR6, les PRG utilisés pour calculer les émissions estimées avec la méthode du mémoire sont les mêmes que ceux utilisés dans l'inventaire de l'arrondissement à des fins de comparaison uniquement avec les émissions de l'arrondissement de Saint-Laurent. Ils sont indiqués dans le tableau 2.12.

Tableau 2.12 PRG utilisés dans
l'inventaire 2017 de l'arrondissement de
Saint-Laurent
D'après les données de Boutin & Tacquet
(2018, p. 13)

Gaz à effet de serre	Formule chimique	PRG
Dioxyde de carbone	CO ₂	1
Méthane	CH ₄	21
Protoxyde d'azote	N ₂ O	310

CHAPITRE 3

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

Ce chapitre présente les résultats obtenus pour les grandes étapes de la méthodologie proposée pour obtenir un inventaire à haute résolution spatio-temporelle. La première partie traite de l'estimation de la circulation à haute résolution spatio-temporelle, tandis que la deuxième traite de la quantification des émissions de GES découlant des débits estimés dans la première partie.

3.1 Estimation de la circulation à haute résolution spatiale et temporelle

Cette section présente d'abord les profils de circulation découlant des facteurs d'ajustement déterminés. L'évaluation des débits estimés est ensuite traitée avant de représenter de manière cartographique la circulation estimée.

3.1.1 Facteurs d'ajustement

Les tendances journalières de la circulation identifiées grâce à la détermination des facteurs d'ajustement horaires sont abordées dans un premier temps. Les tendances hebdomadaires et mensuelles de la circulation sont ensuite présentées à l'aide des profils découlant des facteurs d'ajustement mois-jour.

3.1.1.1 Facteurs horaires et tendances journalières

Les figures 3.1 a) et b) illustrent les profils de circulation qui découlent des facteurs jour-heure, calculés respectivement à partir des comptages de l'intersection Marcel-Laurin/Thimens et de ceux effectués aux autoroutes gérées par le MTMD. Ces figures se lisent telles qu'un point dont l'abscisse vaut 10 fait référence à la circulation entre 10 et 11 h.

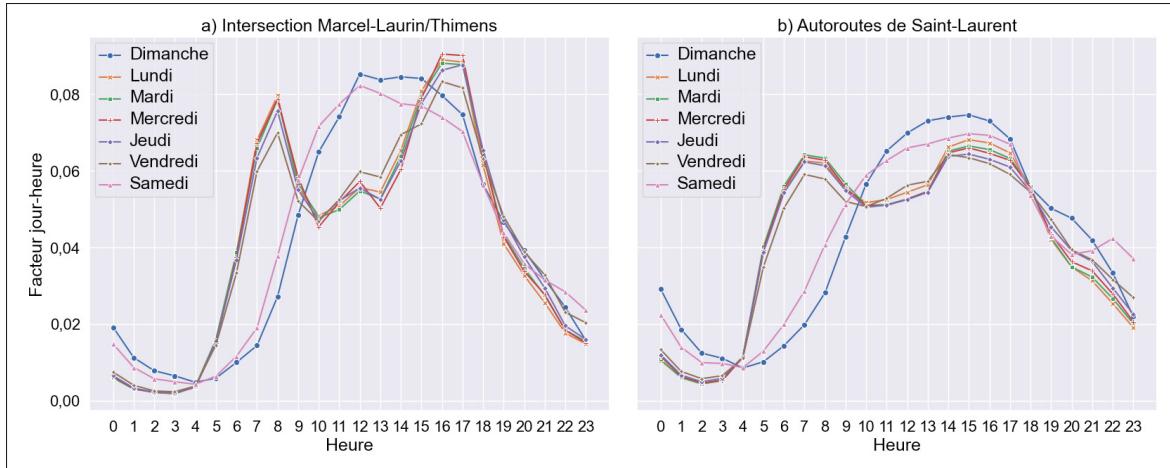


Figure 3.1 Profils de circulation horaires, tous les véhicules compris

La figure 3.1 a) montre qu'à l'intersection Marcel-Laurin/Thimens les jours de semaine (de lundi à vendredi) présentent des profils de circulation similaires entre eux, mais différents des jours de fin de semaine (samedi et dimanche). Les jours de semaine comportent deux maxima représentant les périodes de pointe, l'une ayant lieu le matin entre 8 et 9 h, et l'autre en après-midi entre 16 et 18 h et qui est supérieure à celle du matin. À 16 h le mercredi, la circulation représente 9 % de la circulation journalière et est 15 % plus élevée que la circulation de la même journée à 8 h. On remarque que le vendredi se distingue légèrement des autres jours de la semaine avec un facteur aux heures de pointe inférieur aux autres jours de la semaine, mais des facteurs plus élevés entre 12 et 14 h par rapport aux autres jours de la semaine. Le facteur du vendredi à 16 h est 8 % inférieur à celui du mercredi à la même heure. La circulation les jours de fin de semaine affiche un seul maximum et plus large, entre 12 et 15 h environ. La circulation la nuit est plus élevée les jours de fin de semaine que celle aux mêmes heures les jours de semaine.

Les mêmes observations peuvent être faites pour les sections d'autoroutes retenues pour le calcul des facteurs d'ajustement comme indiqué sur la figure 2.3, autoroutes situées dans l'arrondissement de Saint-Laurent ou aux alentours. En effet, comme montré sur la figure 3.1 b) les profils de circulation présentent deux maxima les jours de semaine (l'un le matin et l'autre en après-midi), un maximum les jours de fin de semaine, et un volume de circulation plus

élevé le samedi et le dimanche aux horaires nocturnes que les jours de semaine. Cependant, la distribution de la circulation est plus étalée dans la journée pour les autoroutes qu'à l'intersection Marcel-Laurin/Thimens, avec des périodes de pointe les jours de semaine entre 7 h et 9 h et entre 14 h et 17 h, et un débit à l'heure qui ne dépasse pas 7 % de la circulation journalière les jours de semaine. Les différences observées entre les profils horaires d'une intersection d'arrondissement et des autoroutes soulignent le besoin de déterminer des facteurs d'ajustement propres aux types de routes pour ensuite extrapoler des volumes de circulation.

La figure 3.2 montre les profils de circulation horaires selon les jours de semaine pour les automobiles, bus et camions à l'intersection Marcel-Laurin/Thimens. Comme les automobiles représentent 97,3 % des véhicules relevés à l'intersection dans les comptages utilisés pour déterminer les facteurs, le profil de tous les types de véhicules montré dans la figure 3.1 s'apparente logiquement à celui des automobiles. Les camions et les bus présentent des variations plus marquées les jours de fin de semaine, mais il est à noter que le volume de véhicules quotidien des camions et des bus est bien moins important que celui des automobiles, et d'autant plus les fins de semaine (de l'ordre d'une centaine de véhicules en moyenne sur les quatre approches de l'intersection contre environ 9 000 pour les automobiles). Une augmentation de quelques véhicules d'une heure à l'autre pour les camions et les bus provoquera des augmentations plus visibles dans les profils de circulation horaires. Les camions présentent un profil s'apparentant à une distribution unimodale avec un maximum vers 10 h les jours de semaine. Les bus présentent plutôt une distribution bimodale les jours de semaine avec une heure de pointe le matin vers 9 h, et une autre l'après-midi vers 14 h. La différence dans les profils de circulation entre les automobiles, les bus et les camions montrent la nécessité de déterminer des facteurs d'ajustement propres aux types de véhicules pour ensuite les appliquer en vue d'estimer des débits horaires.

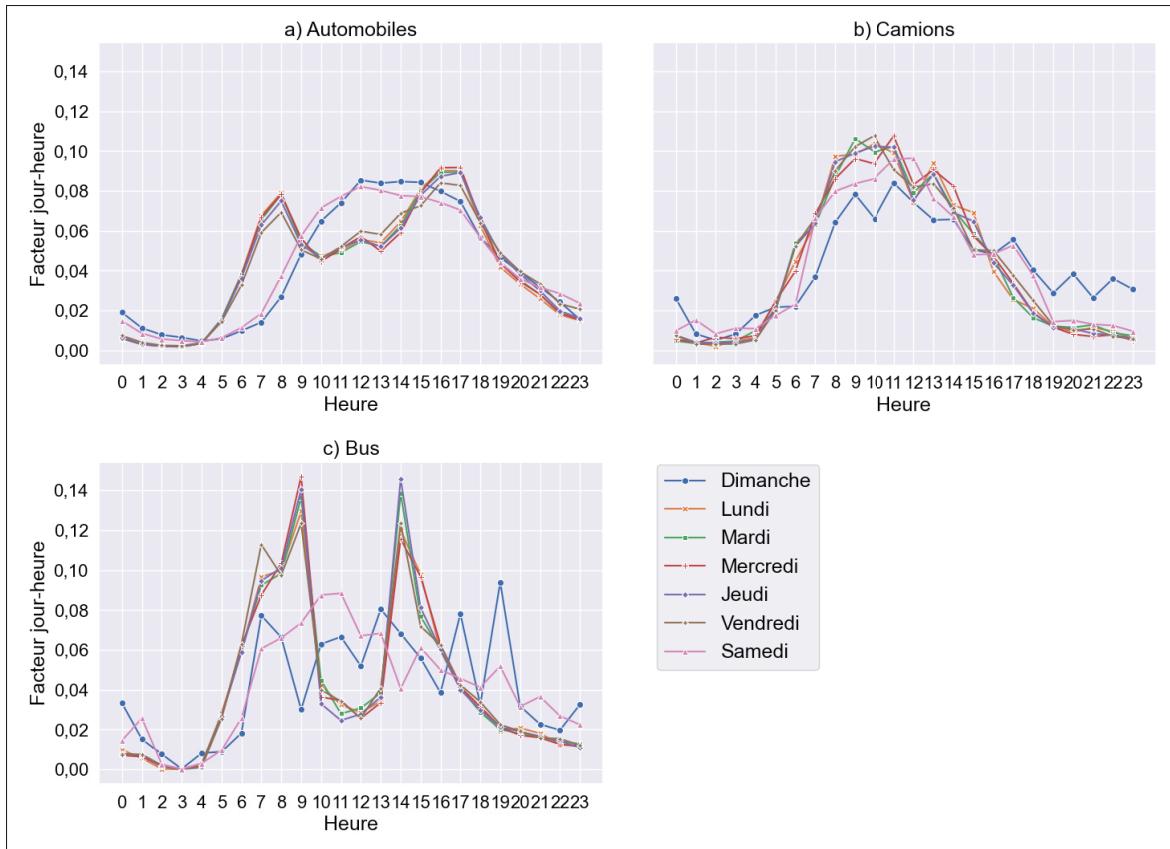


Figure 3.2 Profils de circulation horaires à l’intersection Marcel-Laurin/Thimens selon le type de véhicule

3.1.1.2 Facteurs mois-jours et tendances hebdomadaires et mensuelles

La figure 3.3 illustre l’évolution des facteurs mois-jours sur une année. L’axe des abscisses se lit tel que le premier point représente un dimanche de janvier, le deuxième un lundi de janvier et le dernier point un samedi de décembre. Ainsi, le premier motif représente une semaine moyenne de janvier. Globalement, que ça soit pour l’intersection Marcel-Laurin/Thimens ou les autoroutes, la tendance qui se dégage est que la circulation augmente progressivement de janvier à juin, diminue en juillet en août (probablement en raison des vacances), puis augmente en septembre avant de diminuer jusqu’en décembre. Un jeudi de juin aux autoroutes, le volume de circulation quotidien représente 1,12 % du volume journalier moyen annuel, contre 1,02 % un jeudi de janvier, soit une augmentation de 10 %. La circulation semble ainsi être affectée par

les saisons. La présence de neige pendant les mois d'hiver pourrait expliquer l'évolution de la circulation observée, la neige affectant très certainement les comportements de mobilité.

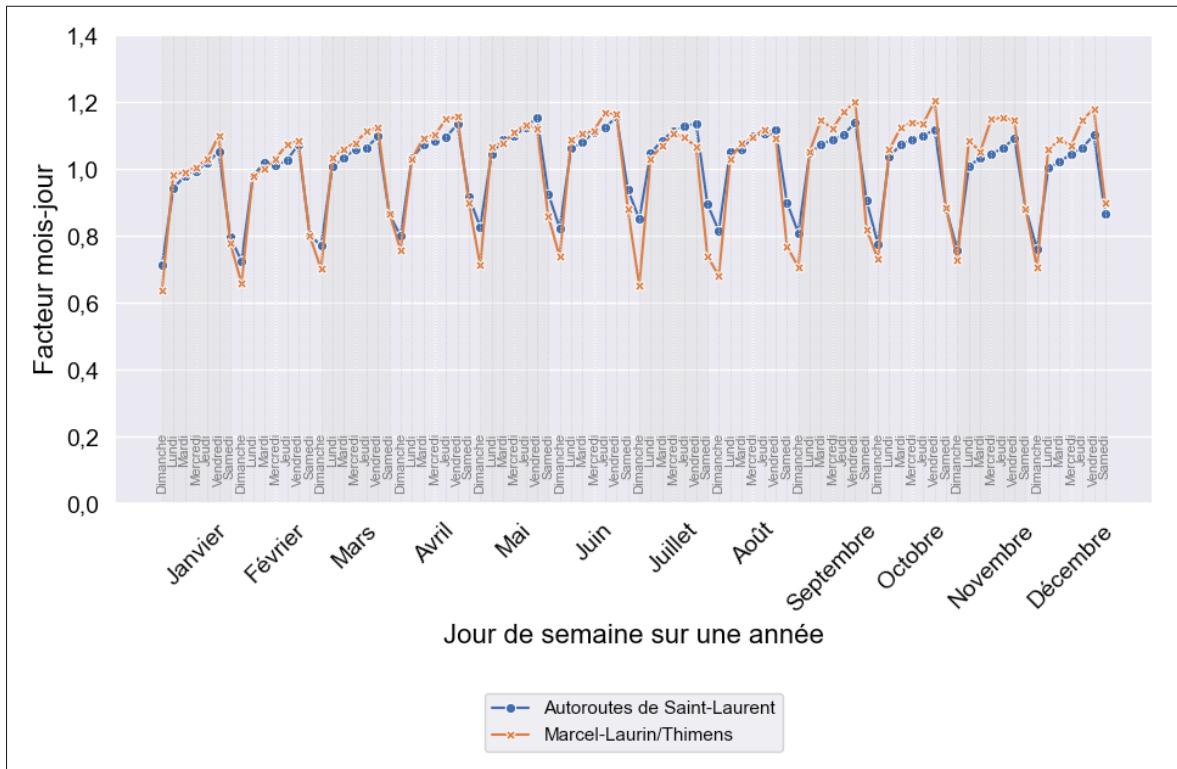


Figure 3.3 Profils de circulation journaliers des jours de semaine sur 12 mois, tous les véhicules compris

De plus, la figure 3.3 montre que généralement, au cours d'une semaine pour un mois donné, la circulation augmente au fur et à mesure du lundi au vendredi. On observe des écarts plus importants au sein d'une même semaine entre les jours de fin de semaine (samedi et dimanche) et les jours de semaine (du lundi au vendredi) pour les facteurs de l'intersection Marcel-Laurin/Thimens que pour ceux des autoroutes, montrant une circulation plus répartie au niveau des autoroutes au cours d'une même semaine.

La figure 3.4 montre les facteurs mois-jour de l'intersection Marcel-Laurin/Thimens calculés séparément pour les automobiles, les camions et les bus. Les automobiles et les bus suivent la tendance observée du profil de circulation de la figure 3.3 avec la baisse de la circulation

pendant les mois de juillet et août. La baisse des bus observée en juillet et en août pourrait être due à l'arrêt de service en juillet et en août de la ligne 126 de la STM passant à l'intersection. En revanche, les camions ne montrent pas de baisses de circulation en juillet et en août. Les profils de circulation entre les véhicules se distinguent également au cours d'une semaine. En effet, le vendredi est en général le jour de la semaine où la circulation automobile est la plus importante pour un mois donné, tandis que pour les camions, les jours en milieu de semaine (mardi, mercredi et jeudi) sont ceux présentant le plus de circulation. Ces constats sont cependant à nuancer puisqu'un facteur d'ajustement de l'intersection Marcel-Laurin/Thimens pour un jour et un mois donné est calculé à partir des relevés effectués sur une seule date de comptage, pour laquelle des conditions particulières de circulation pourraient être survenues.

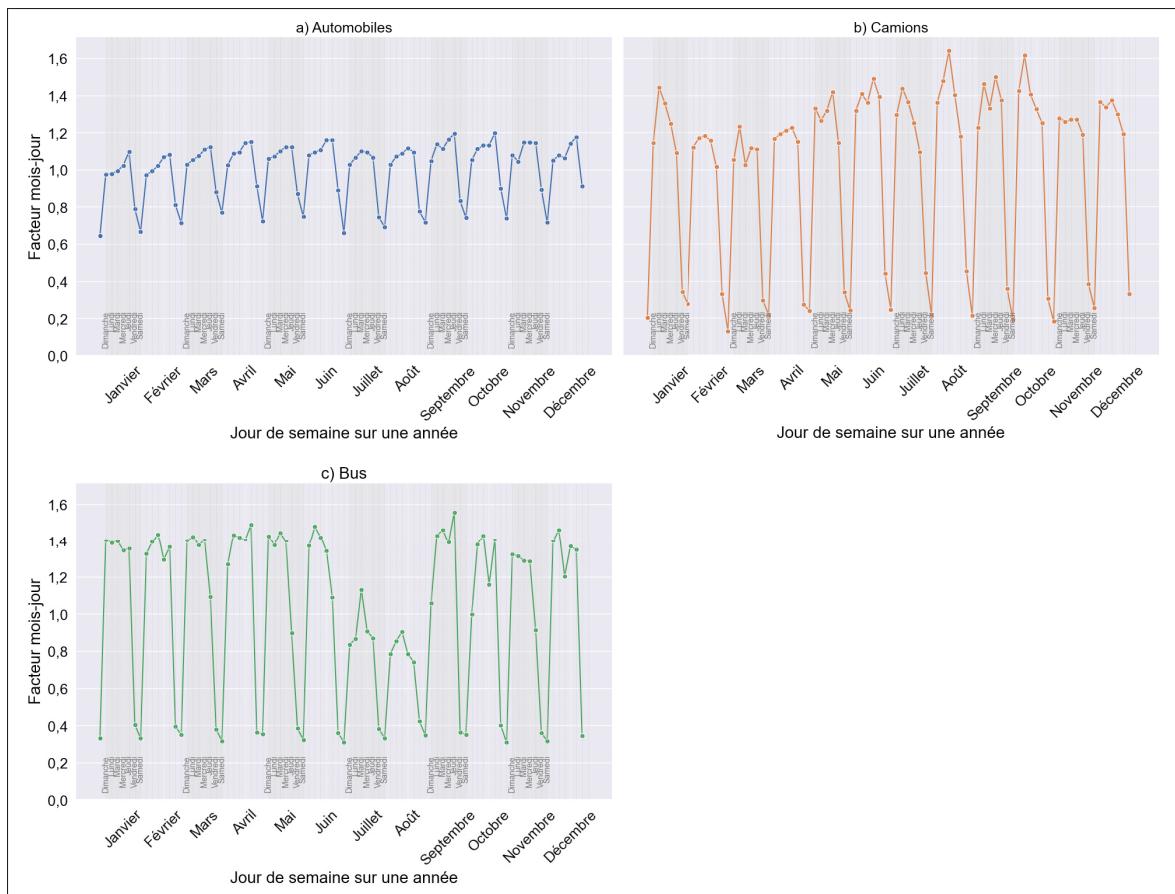


Figure 3.4 Profils de circulation journaliers des jours de semaine sur 12 mois à l'intersection Marcel-Laurin/Thimens selon le type de véhicule

Que ça soit pour les facteurs horaires ou mois-jour, les profils de circulation diffèrent entre les autoroutes et l'intersection Marcel-Laurin/Thimens, mais également selon le type de véhicule. Ces dissimilarités montrent la nécessité de déterminer des facteurs d'ajustement distincts selon le type de route et le type de véhicule, et de les appliquer adéquatement aux volumes de véhicules issus de AIMSUN. Les tendances temporelles de circulation mises en lumière ici se répercuteront sur les émissions puisque ces dernières découlent du produit des débits estimés à partir des facteurs d'ajustement avec des grandeurs qui sont considérées ici comme ne variant pas dans le temps (cf. formule 2.14).

3.1.2 Évaluation des débits estimés

L'analyse des R^2 et des MAPE calculés permettent d'évaluer la robustesse de l'estimation des débits. Les résultats affichés correspondent aux débits calculés à partir de la valeur moyenne des facteurs mois-jour.

3.1.2.1 DJMA

Le tableau 3.1 montre les MAPE déterminés lors de l'étape d'évaluation des DJMA estimés en prenant comme valeurs réelles les DJMA calculés par le MTMD à partir de leurs sites permanents. D'après les valeurs des MAPE, les DJMA estimés peuvent être considérés comme de "bonnes estimations" d'après Lewis (1982) (cf. tableau 2.3). À titre de comparaison, les MAPE obtenus par Streetlight dans leur rapport de 2023 présentant les DJMA estimés avec leur méthode sont compris entre 35,8 % et 9,5 %. Les résultats obtenus ici sont cependant à nuancer car, pour rappel, seuls 3 tronçons routiers identifiés dans le tableau 2.4 ont pu être comparés. De plus, il est à noter que les DJMA fournis par le MTMD excluent les journées non représentatives (congés, travaux, etc.), alors que les DJMA estimés avec la méthode présentée dans ce mémoire incluent des journées non représentatives puisque les facteurs d'ajustement développés ici les incluent.

Tableau 3.1 Comparaison des DJMA estimés avec les DJMA des sites permanents du MTMD

Simulation de départ	Année de référence des DJMA réels	MAPE
MESO DUE AM	2013	15 %
	2015	16 %
	2016	17 %
MESO DUE PM	2013	17 %
	2015	19 %
	2016	19 %

La figure 3.5 montre les DJMA estimés pour les différents tronçons routiers comparés. Les barres horizontales noires représentent les DJMA réels fournis par le MTMD. Les points bleus et orange représentent les DJMA estimés à partir des simulations MESO DUE AM et MESO DUE PM respectivement, en utilisant comme facteur mois-jour la moyenne des facteurs des mois d'automne et des jours de semaine, comme indiqué dans la section 2.1.3.1. Les barres verticales sont délimitées par les valeurs minimales et maximales des DJMA estimés en utilisant comme facteur mois-jour sa valeur maximale et minimale sur la période d'automne les jours de semaine. Pour les tronçons routiers "1202450" et "1303500", les DJMA estimés à partir de la simulation MESO DUE PM sont plus proches des DJMA réels que ceux à partir de la simulation MESO DUE AM. Par exemple pour le tronçon "1302450", l'écart relatif entre le DJMA estimé avec la valeur moyenne du facteur mois-jour et le DJMA réel de 2013 est de 7 % en utilisant la simulation MESO DUE PM, contre 17 % en utilisant la simulation MESO DUE AM. En revanche, pour le tronçon "4009500", les DJMA estimés avec la simulation MESO DUE AM sont plus proches des DJMA réels. Les valeurs réelles des DJMA sont rarement comprises dans la plage de DJMA estimée, exceptée pour les DJMA de 2015 et 2016 de la section "4009500" lorsque la simulation de départ du modèle AIMSUN est MESO DUE AM. Avec ces résultats et

avec le faible nombre de sections comparées, il est difficile de dégager une tendance claire sur la simulation de départ à privilégier pour estimer les DJMA.

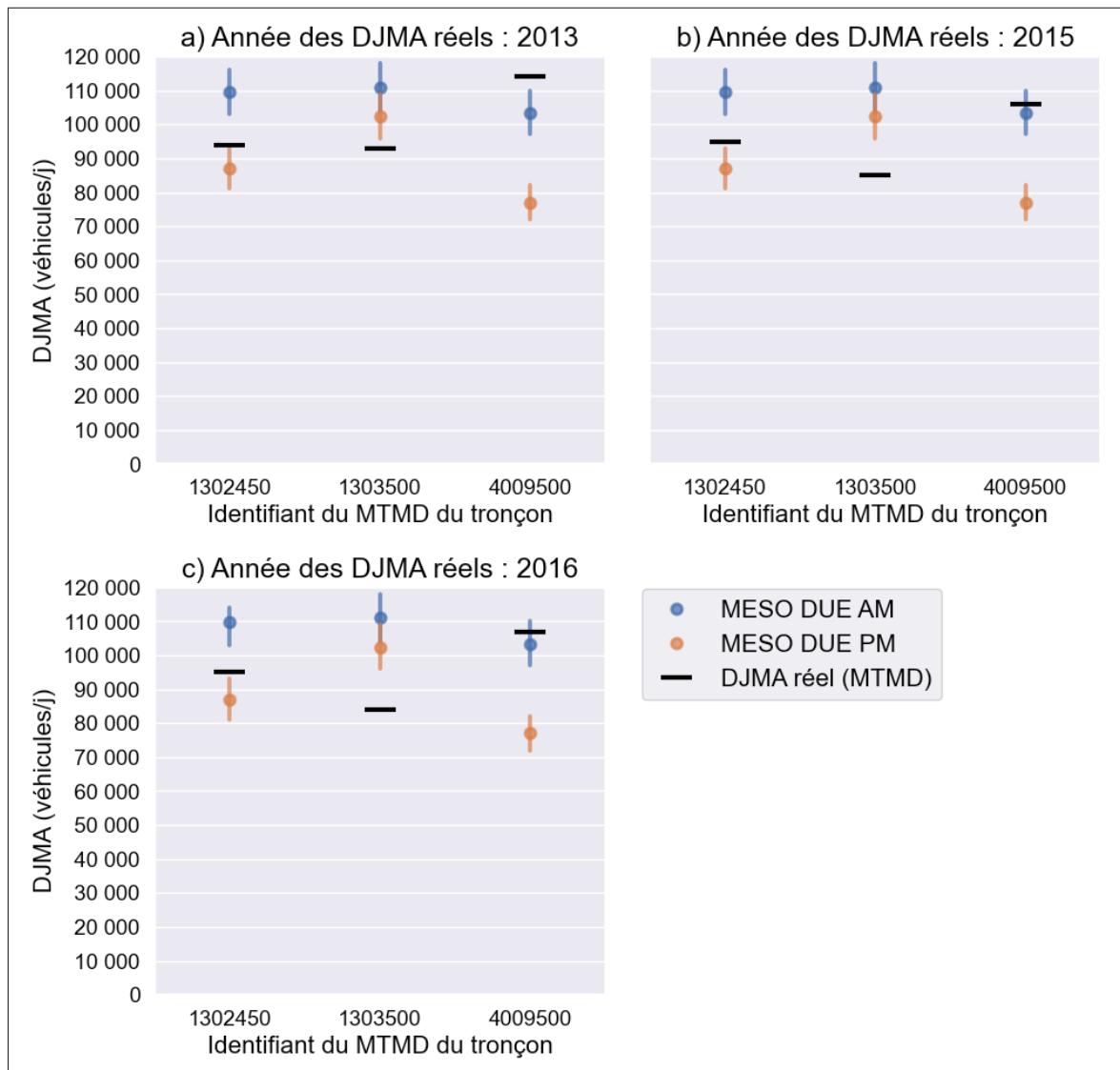


Figure 3.5 DJMA estimés (en bleu et en orange) et DJMA réels (barres noires) des tronçons routiers comparés

3.1.2.2 Débits horaires

Autoroutes

Le tableau 3.2 indique les scores de performance obtenus lors de la comparaison entre les débits horaires estimés et les débits horaires des sites permanents du MTMD relevés en 2013, 2015 et 2016. Le tableau 3.2 montre que, comme on pourrait s'y attendre, les heures du matin sont mieux estimées lorsque la simulation de départ est MESO DUE AM plutôt que MESO DUE PM (meilleurs R^2 et MAPE). En revanche, le choix d'une simulation de départ à utiliser pour estimer les heures de l'après-midi est moins clair. En effet, estimer les heures de l'après-midi avec MESO DUE AM donne un R^2 de 20 % et un MAPE de 31 %, alors qu'utiliser MESO DUE PM pour estimer les heures de l'après-midi donne un R^2 de 6 % et un MAPE de 31 %. La comparaison avec les données de 2015 et 2016 donne un meilleur MAPE lorsque MESO DUE PM est utilisée (30 % contre 38 % pour 2015, et 33 % contre 38 % pour 2016), mais un moins bon R^2 que MESO DUE AM (41 % contre 61 % et 15% contre 51 %). Comme les R^2 obtenus avec les débits issus de la simulation MESO DUE AM sont meilleurs et que les MAPE déterminés pour les deux simulations sont relativement proches, utiliser la simulation MESO DUE AM pour estimer également les heures de l'après-midi semble être le meilleur choix. Pour cette raison, les résultats présentés qui suivent concernent uniquement ceux découlant de la simulation MESO DUE AM. Pour les débits horaires estimés à partir de cette simulation, en prenant en compte l'ensemble des sections d'autoroutes comparables et toutes les heures de la journée, les MAPE calculés sont de 28 %, 38 % et 33 % en se basant sur les débits réels de 2013, 2015 et 2016 respectivement, indiquant une estimation qualifiée de "raisonnable" d'après Lewis (1982). De plus, les coefficients de détermination R^2 valent respectivement 71, 80 et 78 % pour 2013, 2015 et 2016, indiquant une représentation correcte de la distribution des données.

Tableau 3.2 Comparaison des débits horaires estimés avec les débits horaires de 2013, 2015 et 2016 des sites permanents du MTMD

Année de référence	Simulation de départ	Heures comparées	n*	R ²	MAPE
2013	MESO DUE AM	Matin	4 371	91 %	26 %
		Après-midi	4 456	20 %	31 %
		Toute la journée	8 827	71 %	28 %
	MESO DUE PM	Matin	4 371	51 %	40 %
		Après-midi	4 456	6 %	32 %
		Toute la journée	8 827	42 %	36 %
2015	MESO DUE AM	Matin	7 233	90 %	30 %
		Après-midi	7 222	61 %	38 %
		Toute la journée	14 455	80 %	34 %
	MESO DUE PM	Matin	7 233	57 %	49 %
		Après-midi	7 222	41 %	30 %
		Toute la journée	14 455	54 %	40 %
2016	MESO DUE AM	Matin	7 546	92 %	28 %
		Après-midi	7 565	51 %	38 %
		Toute la journée	15 111	78 %	33 %
	MESO DUE PM	Matin	7 546	51 %	50 %
		Après-midi	7 565	15 %	33 %
		Toute la journée	15 111	42 %	41 %

* n représente le nombre de points de comparaison.

La figure 3.6 montre les débits horaires estimés en fonction des débits horaires réels de 2013 des autoroutes de 2013 pour chaque section de route du réseau routier du modèle AIMSUN (identifié par son identifiant "oid") comparable avec les sections du réseau du MTMD, ainsi que les R² et MAPE correspondants. Cette figure permet d'identifier des sections de route

dont les débits horaires seraient mieux estimés que d'autres. Les MAPE indiquent que pour toutes les sections comparées ici, les estimations sont raisonnables, voire bonnes d'après Lewis (1982). Le MAPE de 50 % de la section dont l'oid est "215418" est la valeur limite au-delà de laquelle une estimation est considérée comme inexacte, indiquant une estimation moins performante sur cette section de route. La section se situant dans la direction opposée comporte pourtant un MAPE raisonnable et un R^2 correct. Les sections "181369", "215496" et "518271" présentent des MAPE entre 10 et 20 %, indiquant une bonne estimation des débits horaires pour ces sections. À noter que les données de 2016 du site permanent du MTMD "401000" (section équivalente à la section du modèle AIMSUN "518271") ont été utilisées pour déterminer les facteurs d'ajustement.

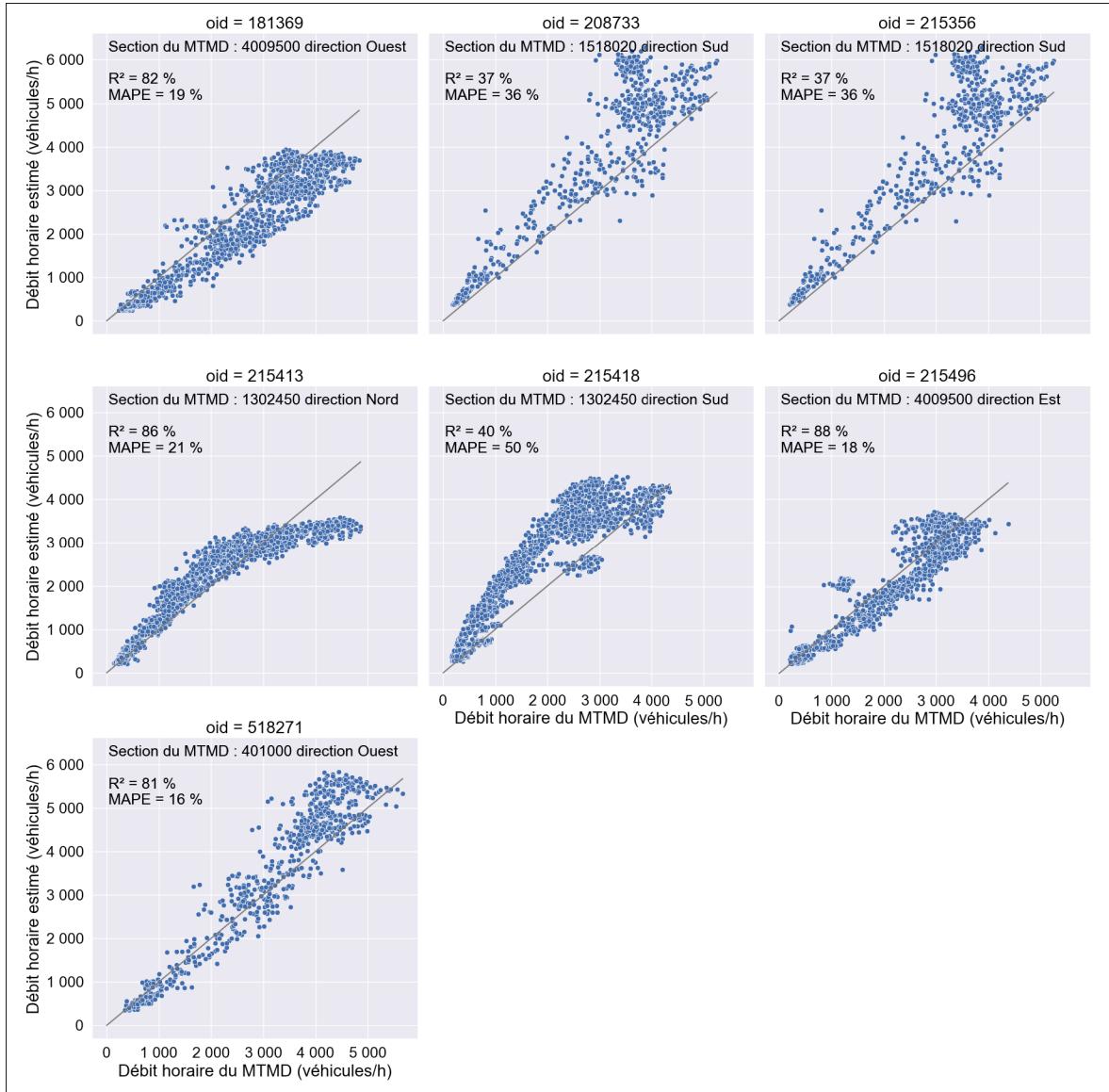


Figure 3.6 Débits horaires estimés en fonction des débits horaires réels des autoroutes de 2013 pour chaque section de route comparée

La figure 3.7 montre les écarts relatifs entre les débits horaires estimés et les débits du MTMD en fonction du temps, pour chaque section de route comparée. Cette figure permet ainsi d'identifier des moments où les débits seraient plus ou moins bien estimés. L'axe des abscisses se lit tel que le point d'abscisse 1 correspond à l'écart relatif des débits concernant le mois de janvier un dimanche entre minuit et 1 h et, et que le point d'abscisse 2016 concerne le mois de décembre

un samedi entre 23 h et minuit. Les points manquants sont liés aux données manquantes dans les relevés horaires des sites permanents. On observe à certains endroits des écarts relatifs anormalement élevés, par exemple à la section "215496" où, pendant le mois d'avril, les écarts relatifs dépassent 300 %. Pour rappel, les débits horaires "réels" auxquels sont comparés les débits horaires estimés pour une heure h , un jour j et un mois m , constituent une moyenne des volumes relevés à différentes dates à l'heure h dont le jour et le mois correspondent au jour j et au mois m . Or, les écarts relatifs anormalement importants ont lieu pour des moments où une seule date de collecte a pu être utilisée pour calculer le débit moyen réel en raison de données manquantes aux autres dates compatibles. Ainsi, un événement particulier pouvant survenir à l'unique date collectée peut perturber la circulation et le débit moyen utilisé comme référence peut ne pas être représentatif du débit moyen pour l'heure h , d'un jour j et du mois m . De plus, les moments où les écarts relatifs sont très importants coïncident avec des moments où l'ordre de grandeur des volumes relevés sur les sites permanents chutent par rapport aux volumes précédents, ce qui génère forcément un écart relatif plus important.

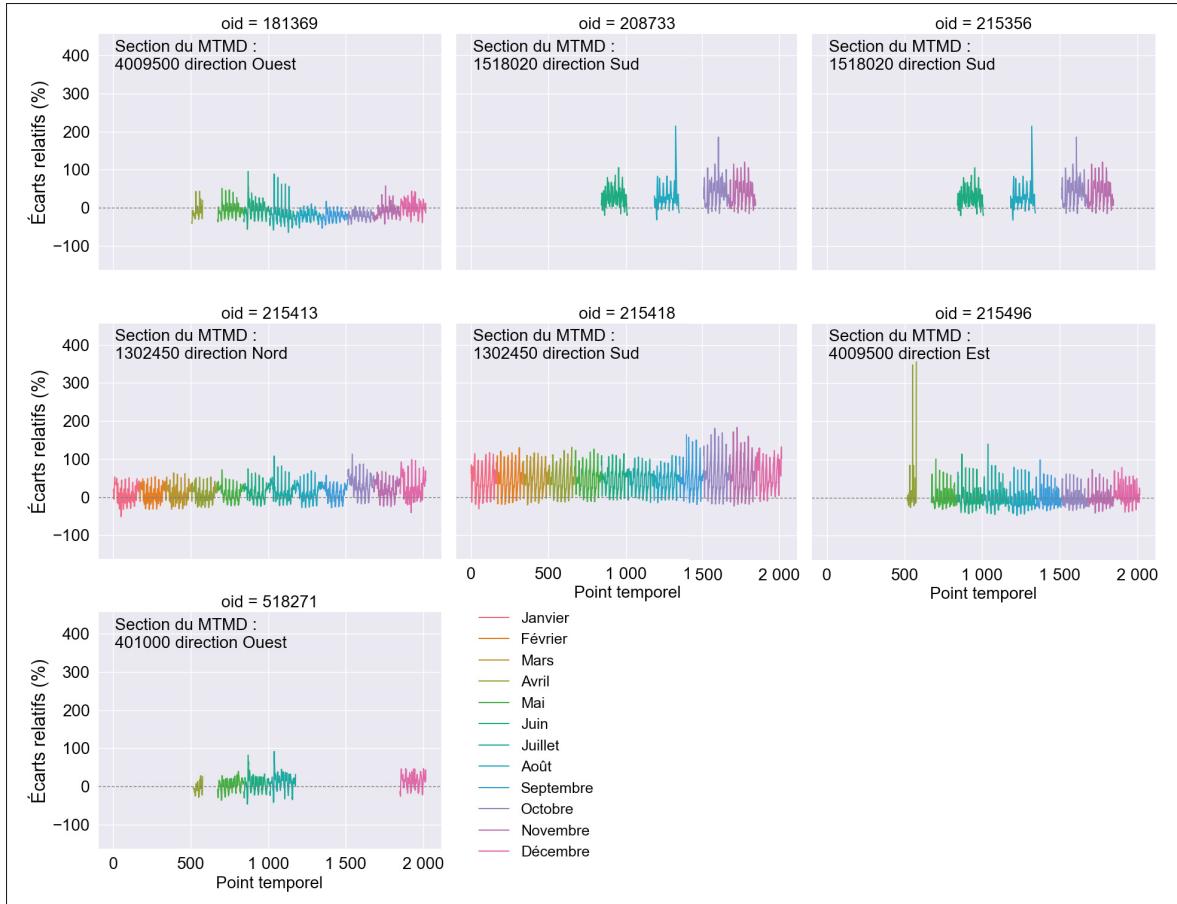


Figure 3.7 Écarts relatifs entre les débits horaires estimés et ceux réels des sites permanents du MTMD relevés en 2013

Routes d'arrondissement

La figure 3.8 montre pour quatre sections de route situées dans l’arrondissement, l’évolution temporelle des débits estimés (en bleu) et des comptages réels issus du jeu de données des comptages aux intersections de 2013 (en orange). Les sections présentées ici sont choisies de manière à couvrir des routes qui accueillent des ordres de grandeurs de volumes de véhicules différents. Pour rappel, le jeu de données des comptages aux intersections présentant une couverture temporelle limitée (une date couverte par an par intersection), les débits en orange sont des débits issus d’une collecte effectuée sur une seule date, et non pas un débit moyen pour un jour de la semaine et un mois donnés, alors que les débits estimés représentent un débit

moyen censé représenter le jour et le mois considérés. Cette différence dans la définition des débits en bleu et en orange peut expliquer les écarts importants entre eux. On retrouve cependant dans les débits estimés les tendances temporelles des comptages, avec une heure de pointe le matin et l'après-midi, ainsi qu'une autre augmentation du volume de véhicules vers midi.

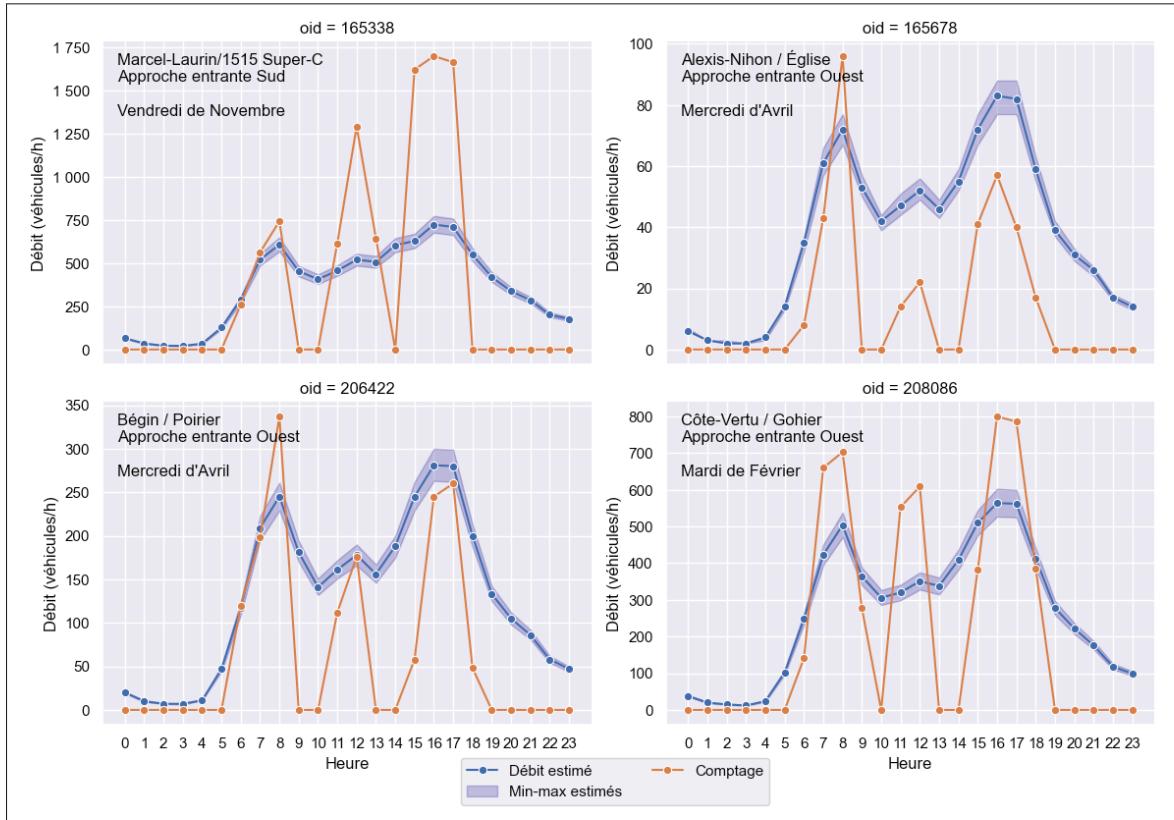


Figure 3.8 Débits horaires estimés et débits horaires des comptages aux intersections

3.1.3 Circulation estimée

Les figures 3.9 et 3.10 montrent respectivement les DJMA et les VKT estimés à partir de ces mêmes DJMA. La circulation est plus importante au niveau des grands axes routiers, et particulièrement au niveau des autoroutes, routes qui ont une plus grande capacité en termes de volumes de véhicules. Les routes en violet représentent les segments pour lesquels la simulation AIMSUN n'a généré aucun véhicule en sortie.

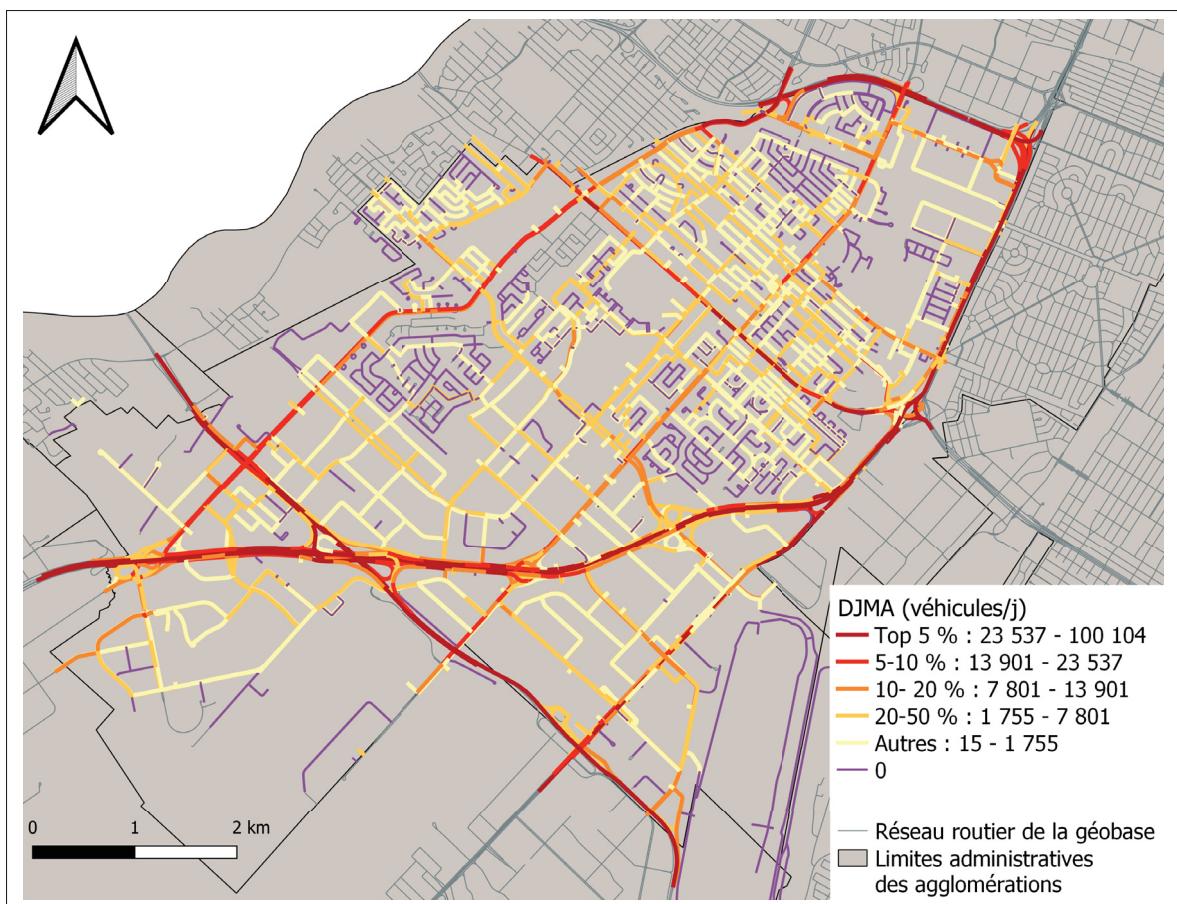


Figure 3.9 DJMA estimés, tous types de véhicules compris

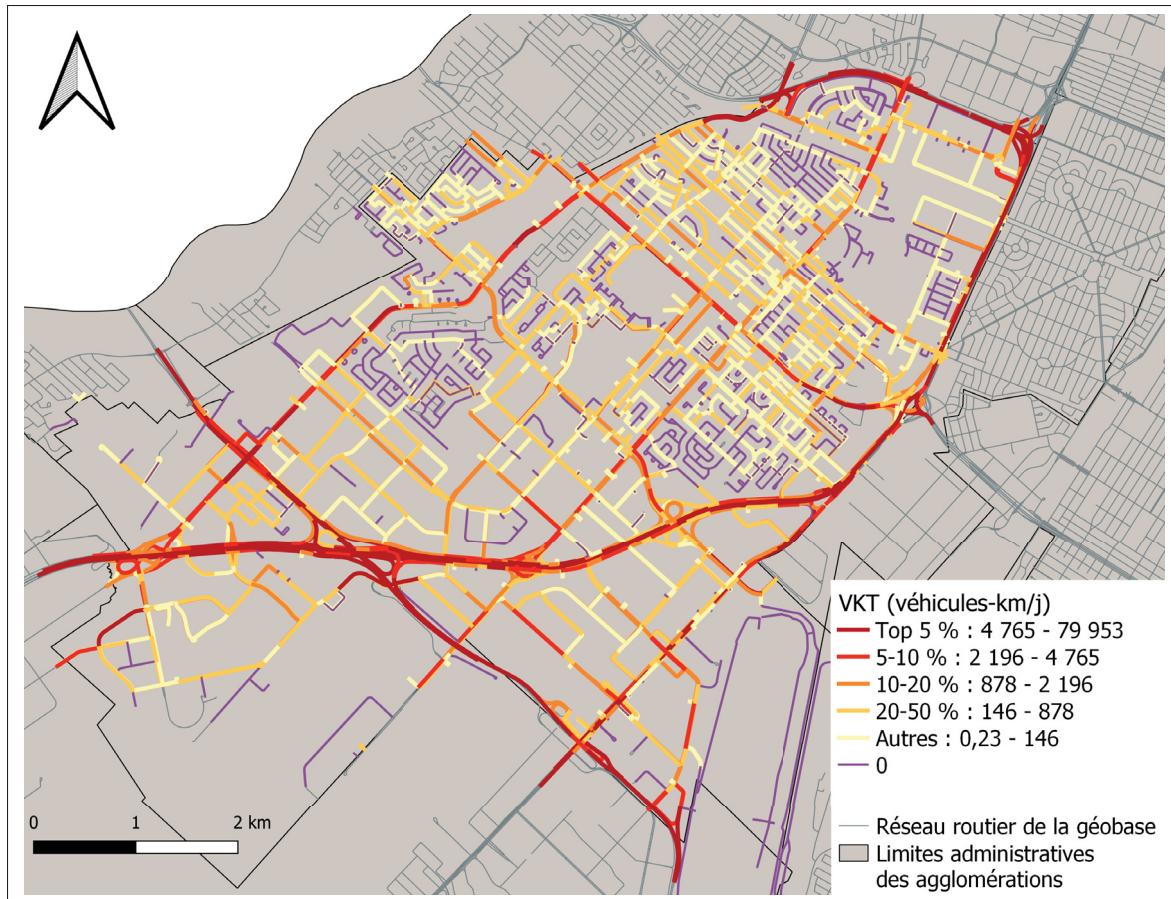


Figure 3.10 VKT estimés à partir des DJMA, tous types de véhicules compris

La représentation cartographique de l'évolution de la circulation dans le temps étant difficile sur un support statique, seules les valeurs moyennes journalières annuelles des débits de véhicules et VKT sont présentées. De plus, les tendances temporelles de la circulation se retranscriront dans celles des émissions qui sont présentées dans les prochaines sections.

3.2 Estimation des émissions de GES à haute résolution spatiale et temporelle

Cette section présente les émissions de GES calculées pour plusieurs résolutions temporelles. Les émissions journalières moyennes pour l'année sont d'abord traitées, avant d'aborder celles sur une base journalière et horaire pour des jours de semaine et mois spécifiques.

3.2.1 Émissions journalières moyennes sur l'année

D'après le tableau 3.3, les émissions produites en moyenne par jour sur l'ensemble des segments de route découlant de la méthode développée sont de 1 120 t éq. CO₂/j. On constate que même si les camions (camions réguliers et camions lourds) représentent 4,4 % du débit moyen journalier annuel sur l'ensemble de l'arrondissement, ils sont responsables de 13 % des émissions.

Tableau 3.3 Moyenne journalière des émissions par type de véhicule

Type de véhicule	Contribution au DJMA	Émissions de GES (t éq. CO ₂ /j) ^{*,**}	Contribution aux émissions de GES
Véhicules légers particuliers (vlp)	86,2 %	849 (-55 à +56)	76 %
Véhicules légers commerciaux (vlc)	8,8 %	106 (-7 à +7)	9 %
Camions réguliers (vrg)	2,9 %	68 (-4 à +5)	6 %
Camions lourds (vlo)	1,5 %	74 (-7 à +6)	7 %
Bus (bus)	0,5 %	23 (-3 à +8)	2 %
Total		1 120 (-77 à +81)	

* Les bornes des plages d'incertitude sont calculées en utilisant les bornes minimales et maximales des DJMA.

** Les résultats affichés ici sont calculés avec les PRG de l'AR6.

Le tableau 3.4 permet de comparer les émissions estimées à partir de la méthode développée avec celles indiquées dans l'inventaire 2017 de l'arrondissement de Saint-Laurent. À noter que ce tableau est le seul élément du chapitre 3 présentant des résultats d'émissions calculés à partir des PRG utilisés dans l'inventaire 2017 de l'arrondissement à des fins de comparaison, les autres résultats étant calculés à partir des PRG de l'AR6. Les émissions de l'ensemble des véhicules générées en moyenne par jour estimées à partir de la méthode développée représentent 1,8 fois les émissions indiquées dans l'inventaire 2017 de l'arrondissement. Outre le fait que l'année

du modèle AIMSUN et celle des données utilisées pour les facteurs d'ajustement diffèrent de 2017, cette différence s'explique par le fait que la méthode développée dans ce mémoire et l'inventaire de Saint-Laurent ne calculent pas les mêmes émissions. En effet, les émissions de l'inventaire de Saint-Laurent sont calculées en utilisant une approche descendante, avec comme proxy le nombre d'immatriculations de l'arrondissement pour ramener à l'échelle de l'arrondissement les émissions de la province. Les émissions de l'inventaire de Saint-Laurent représentent donc en théorie plutôt les émissions liées au transport des personnes et organismes domiciliés dans l'arrondissement, et supposent des comportements uniformes à travers la province donc nonobstant le lieu de domicile. On observe également que la hiérarchie de contribution aux émissions est la même entre les résultats issus de la méthode développée et ceux de l'inventaire de l'arrondissement, puisque les véhicules qui contribuent le plus aux émissions sont les véhicules légers, puis les camions et les autobus. En revanche, on observe des ordres de grandeur de contribution qui diffèrent, avec une part plus importante des camions lourds d'après l'inventaire de Saint-Laurent (34 %) par rapport aux émissions déterminées avec la méthode développée (6 %). Cette différence peut également s'expliquer par la différence de méthode utilisée, puisque le nombre d'immatriculations de camions lourds d'une entreprise de transport de fret dans l'arrondissement de Saint-Laurent augmenterait les émissions de ce type de véhicule.

Tableau 3.4 Comparaison entre la méthode développée et l'inventaire 2017 de Saint-Laurent

Méthode développée			Inventaire 2017 de Saint-Laurent	
Type de véhicule	Émissions de GES (t éq. CO ₂ /j) ^{*,**}	Contribution aux émissions	Émissions de GES (t éq. CO ₂ /j)	Contribution aux émissions
Véhicules légers***	954 (-62 à +63)	85 %	394	63 %
Bus	23 (-3 à +8)	2 %	20	3 %
Camions lourds	74 (-7 à +6)	7 %	210	34 %
Camions réguliers	69 (-4 à +5)	6 %		
Total	1 120 (-77 à +81)	100 %	624	100 %

* Les bornes des plages d'incertitude sont calculées en utilisant les bornes minimales et maximales des DJMA.

** Les résultats affichés ici pour la méthode développée sont calculés avec les PRG utilisés dans l'inventaire de Saint-Laurent.

*** Les véhicules légers correspondent aux véhicules légers particuliers (vlp) et commerciaux (vlc) dans le cas de la méthode développée ; ils correspondent aux automobiles et camions légers tels que nommés dans l'inventaire 2017 de Saint-Laurent.

La figure 3.11 montre les densités d'émissions pour chaque section de route. Les segments routiers sont classés selon leur importance en matière d'émissions par kilomètre, de telle manière que le top 5 % représente 5 % des segments les plus émetteurs. Les émissions les plus importantes se situent au niveau des grands axes routiers en raison du haut volume de véhicules qui y circulent, et particulièrement au niveau des autoroutes. Le top 5 % des sections les plus émettrices contribuent à 41 % des émissions totales.

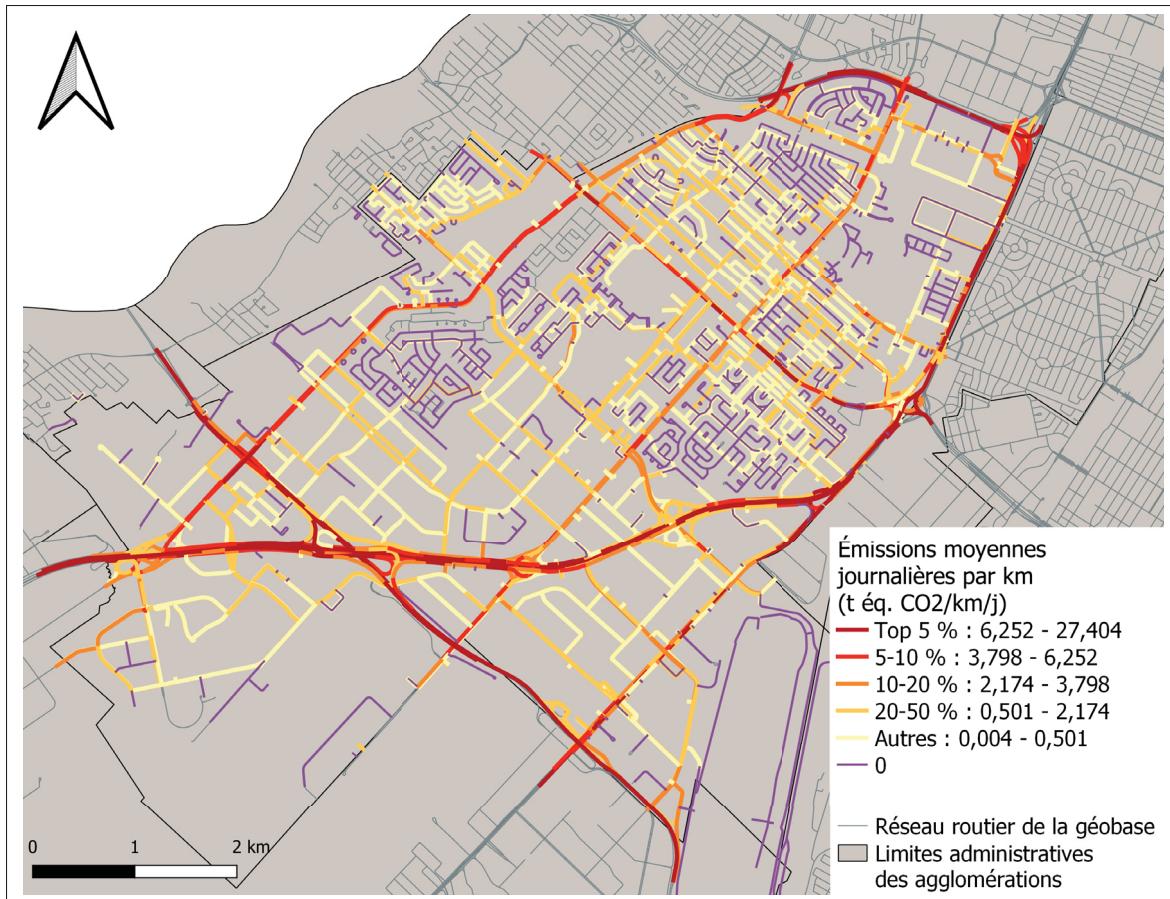


Figure 3.11 Densités d'émissions moyennes journalières par section de route

La figure 3.12 représente également les densités d'émissions des sections de route, mais met en valeur 20 % des sections les plus émettrices en termes de densité d'émissions. Celles-ci représentent 74 % des émissions totales.

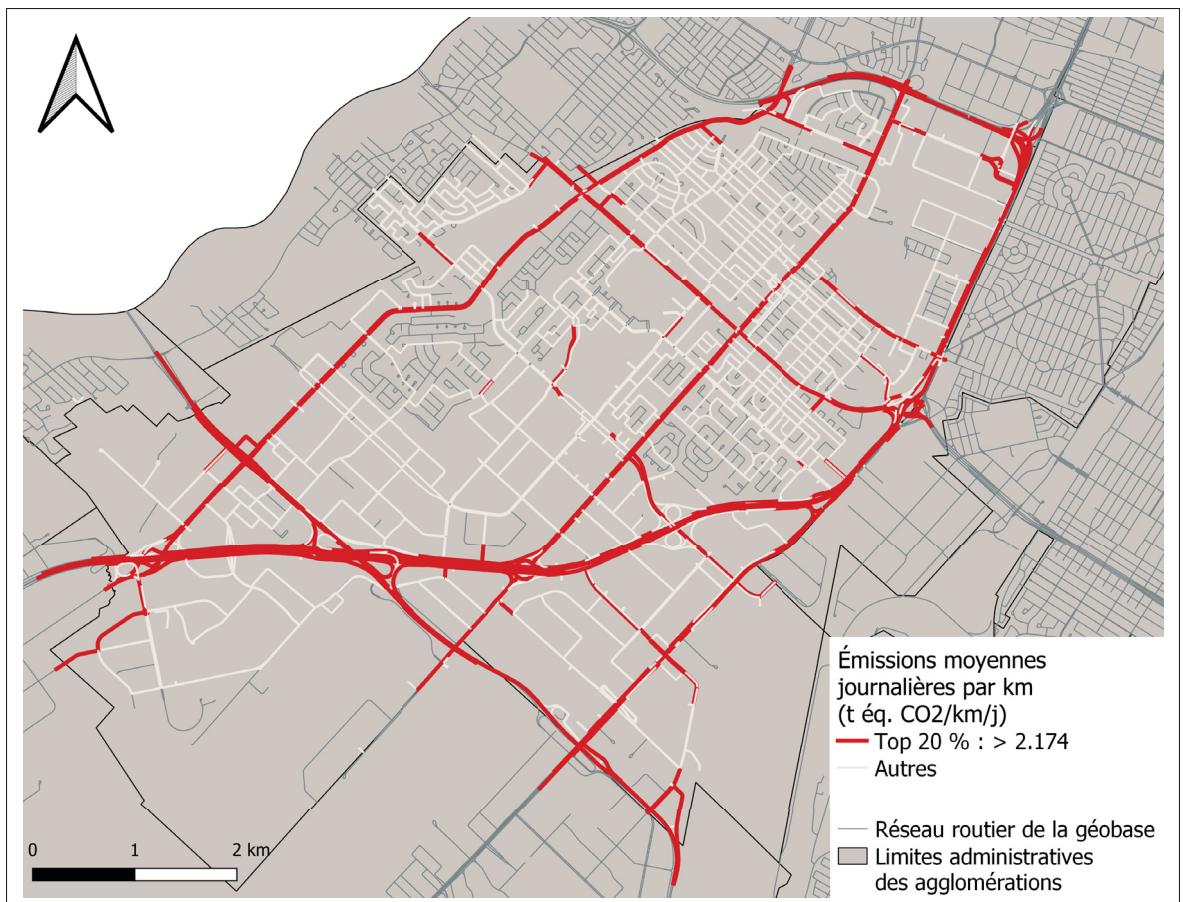


Figure 3.12 Sections de routes les plus émettrices en termes de densité d'émissions

3.2.2 Émissions de GES journalières

La figure 3.13 montre l'évolution des émissions journalières sur les 7 jours de la semaine sur les 12 mois de l'année, sur l'ensemble des sections de route classées comme des autoroutes d'une part, et sur l'ensemble des autres types de routes d'autre part. Alors que les segments routiers des autoroutes représentent 18 % de la longueur totale du réseau routier modélisé, les émissions journalières sur les autoroutes sont en moyenne 78 % plus élevées que celles des autres sections de route.

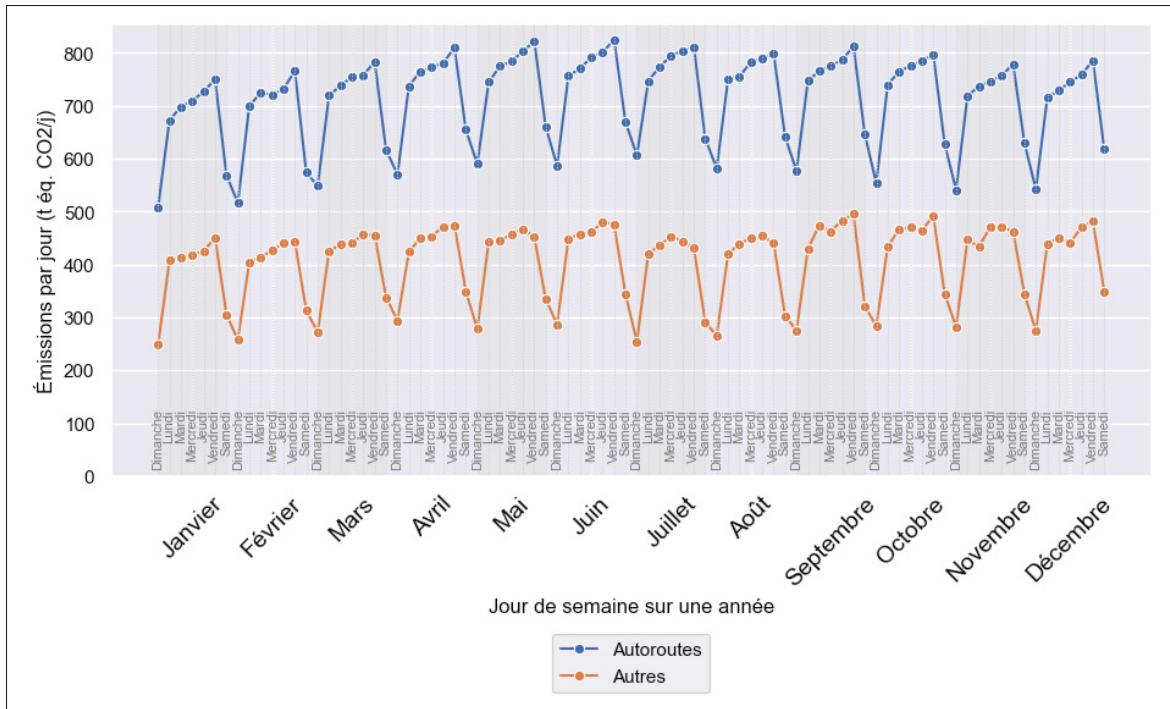


Figure 3.13 Émissions journalières sur l'ensemble des sections de route sur les 7 jours de la semaine sur 12 mois en fonction du type de route

3.2.3 Émissions de GES horaires

La figure 3.14 montre l'évolution des émissions horaires pour un jour de semaine (mercredi) et un jour de fin de semaine (samedi) en mai. Comme attendu, les profils des émissions horaires suivent ceux des facteurs d'ajustement horaires. Un mercredi de mai entre 16 et 17 h, les émissions générées sur l'ensemble des routes modélisées sont de 90 t éq. CO₂/h, contre 70 t éq. CO₂/h sur la même période un samedi de mai.

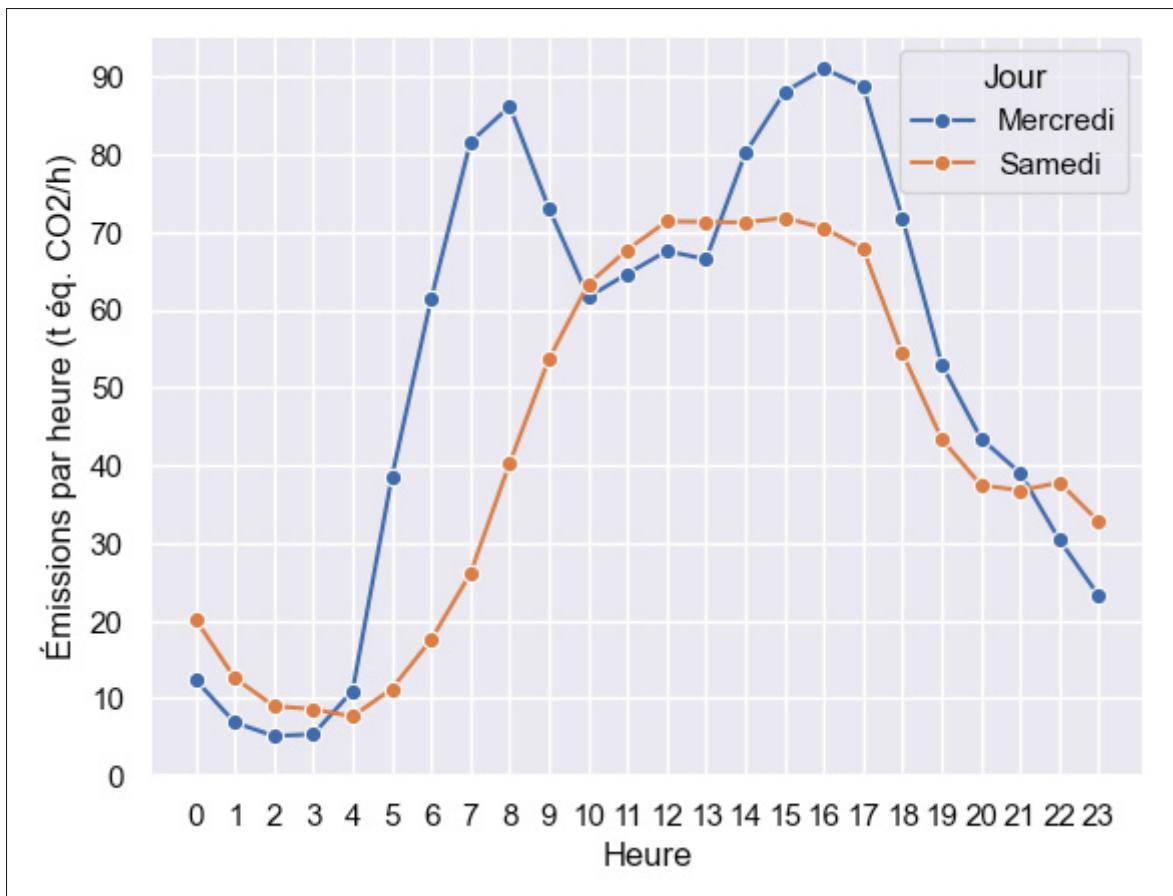


Figure 3.14 Émissions horaires d'un mercredi et d'un samedi de mai sur l'ensemble des sections de route pour tous les types de véhicules

La figure 3.15 illustre également l'évolution des émissions horaires, mais sous une forme cartographique en représentant les densités d'émissions pour chaque section de route à différentes heures de la journée d'un mercredi de mai. Les routes les plus émettrices sont encore une fois les grands axes routiers, quelle que soit l'heure de la journée.

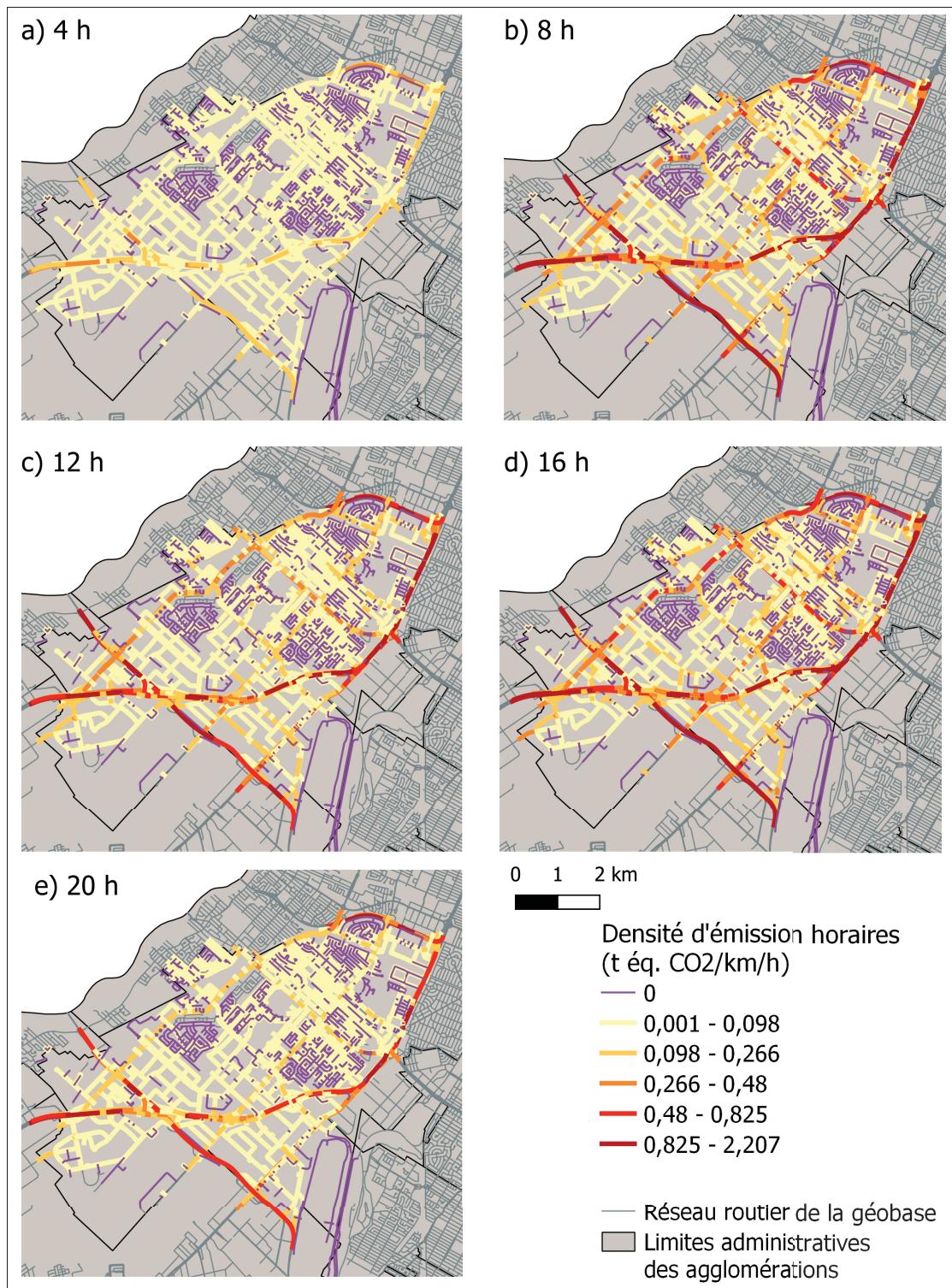


Figure 3.15 Densités d'émission pour différentes heures d'un mercredi de mai

CHAPITRE 4

DISCUSSION

La méthode développée permet de fournir un inventaire avec une résolution spatiale à l'échelle des segments routiers et pour plusieurs résolutions temporelles (journalière et horaire) permettant de visualiser l'évolution des émissions au cours de la journée et sur une année. La combinaison de données de comptages avec un modèle de circulation a permis d'étendre la résolution temporelle définie par le modèle de circulation correspondant à une journée ouvrable typique d'automne sur l'heure de pointe. Ce chapitre vise à discuter de la méthode élaborée, ainsi que des limites repérées et des recommandations d'améliorations. Le projet de recherche s'inscrivant dans le projet plus global de Carte Carbone de Montréal, l'intégration du travail mené ici dans la Carte Carbone est finalement abordée.

4.1 Méthode ascendante pour un inventaire à haute résolution spatio-temporelle

L'approche ascendante utilisée fournit des indications quant aux sources des émissions. La Ville de Montréal utilise également désormais une approche ascendante grâce à l'outil EIE de Google, mais les émissions en résultant restent une valeur annuelle unique. Apporter une résolution spatio-temporelle à l'inventaire permet d'identifier les routes et les instants les plus contributeurs aux émissions, et ainsi d'imaginer des mesures de réduction adéquates.

La comparaison des émissions quantifiées à l'aide la méthode développée pour l'arrondissement de Saint-Laurent avec celles de l'inventaire 2017 de l'arrondissement montre que les émissions estimées dans ce mémoire surpassent celles de l'inventaire, constat également observé dans la littérature entre les résultats d'émissions découlant d'une approche ascendante par rapport aux inventaires traditionnels. De plus, comme expliqué dans le chapitre 3, en raison de la méthode utilisée dans l'inventaire 2017 de l'arrondissement de Saint-Laurent, les émissions de l'inventaire de l'arrondissement représentent plutôt en théorie les émissions des véhicules immatriculés dans l'arrondissement, alors que les émissions estimées dans ce mémoire correspondent plutôt aux émissions des véhicules circulant dans l'arrondissement. Par ailleurs, l'analyse des résultats a

montré l'importance de développer des facteurs d'ajustement propres aux types de routes, aux types de véhicules et selon l'heure, le jour de la semaine et le mois considérés.

4.2 Limites et améliorations

La méthodologie développée comporte certaines limites et voies d'amélioration. Elles sont relatives aux données utilisées, à la disponibilité de ces dernières, aux hypothèses faites et à l'inclusion de certains paramètres influençant les émissions.

4.2.1 Jeux de données utilisés

En raison du manque de données, les années des jeux de données utilisées sont différentes. Combiner des données de diverses années constitue une limite pour obtenir un portrait des émissions relatif aux comportements de mobilité d'une année donnée, sachant que les comportements peuvent être influencés par des conditions météorologiques particulières ou des politiques mises en place. Dans la perspective de suivi des tendances des émissions au fur et à mesure des années, disposer de données propres à une période temporelle voulue constitue un point crucial.

De plus, les définitions des véhicules diffèrent selon les jeux de données. Elles reposent en effet sur des caractéristiques différentes, rendant incertaine la bonne association des données entre les jeux de données, alors que celles-ci dépendent du type de véhicule (consommation de carburant ou facteur d'émission par exemple).

En outre, l'agrégation de différents types de véhicules (véhicules légers particuliers, commerciaux et camions réguliers) au sein d'une seule matrice O-D "voiture" dans le modèle de circulation entraîne des incertitudes quant à la répartition de ces véhicules sur le réseau. En effet, pour distinguer les véhicules légers particuliers des véhicules légers commerciaux et des camions réguliers, un pourcentage relatif à chacun de ces types de véhicules est appliqué aux véhicules issus de la matrice "voiture", supposant que la proportion de véhicules légers particuliers, commerciaux et de camions réguliers parmi les véhicules découlant de la matrice est la même sur

chaque section de route. Incorporer dans le modèle AIMSUN une matrice propre à chacun de ces types de véhicules permettrait d'éliminer cette hypothèse. Par ailleurs, les facteurs d'ajustement associés aux automobiles et aux camions pourraient également être appliqués de manière plus appropriée en fonction du type de véhicule, lorsque les données de comptage permettent la distinction du type de véhicule. Pour rappel, les facteurs d'ajustement des autoroutes concernent tous les types de véhicules, puisque les données de comptage des sites permanents ne distinguent pas le type de véhicule, contrairement aux comptages aux intersections.

Une autre source d'incertitude est la demande en déplacement des véhicules commerciaux en entrée du modèle AIMSUN, qui ne découle pas de données empiriques, contrairement à la demande des véhicules particuliers issus de données d'enquête O-D. De plus, l'inclusion de certains véhicules au sein des matrices synthétiques des camions, comme les camions de collecte des ordures ménagères, est peu claire.

Un autre axe d'amélioration concernant le modèle AIMSUN est la manière dont les centroïdes sont connectés pour représenter la structure spatiale de la circulation. En effet, on constate qu'en sortie du modèle AIMSUN, certaines sections de route ne sont pas empruntées, témoignant de la sensibilité des résultats au modèle. Il est important de rappeler que les modèles sont des représentations imparfaites de la réalité.

Les résultats d'émission sont également sensibles aux données de consommation de carburant et facteurs d'émission. La plupart des consommations de carburant des véhicules légers découlent par exemple de tests constructeurs réalisés en laboratoire où différentes conditions sont simulées, mais ne représentent pas forcément des conditions réelles. Une analyse de sensibilité pourrait être réalisée pour estimer l'influence du choix des jeux de données utilisées pour les consommations de carburant et facteurs d'émission, notamment avec MOVES.

4.2.2 Extrapolation temporelle et évaluation des débits

Les facteurs d'ajustement déterminés dans ce mémoire incluent des journées non représentatives (travaux, vacances, accidents), excepté pour les facteurs mois-jours des autoroutes où des débits

représentatifs sont utilisés, comme expliqué dans la section 2.1.2.2. L'inclusion de journées non représentatives compromet la fidélité de la représentation d'une journée moyenne en termes de circulation. L'exclusion des journées non représentatives pourrait être réalisée en se basant sur le jeu de données des collisions routières (<https://donnees.montreal.ca/dataset/collisions-routieres#additional-info>) pour connaître les accidents, sur celui des entraves et travaux en cours (<https://donnees.montreal.ca/dataset/info-travaux>) pour connaître les jours de travaux, et sur le calendrier pour connaître les jours fériés et les vacances (Ville de Montréal, 2025b,c). Le jeu de données des entraves et travaux en cours est cependant limité dans le temps puisque les plus anciennes données datent de 2021.

En raison de la couverture temporelle limitée des données de comptage, hormis les sites permanents au niveau des autoroutes, les profils temporels d'une seule intersection ont été déterminés et appliqués pour toutes les routes de l'arrondissement, hors autoroute, en supposant qu'elles suivent le profil de l'intersection Marcel-Laurin/Thimens. Collecter des données sur une plus grande période sur au moins une année et sur d'autres intersections ou routes permettrait de confirmer ou infirmer cette hypothèse. Dans le cas où cette hypothèse n'est pas vérifiée, la construction de groupes de routes répondant à un même profil temporel permettrait d'affiner l'application des facteurs d'ajustement en fonction des routes. La FHWA recommande d'ailleurs dans le cadre de l'élaboration d'un programme de collecte des volumes routiers et des DJMA, d'élaborer des groupes pour les sites de comptage selon leurs similarités. Regehr et al. (2015) ont développé une méthode pour grouper des sites de comptage présentant des profils temporels horaires et des caractéristiques similaires, comme la classe fonctionnelle des routes ou l'usage des terres (résidentiel, commercial ou industriel) (Regehr, Montufar & Hernandez-Vega, 2015). À court terme, l'extrapolation temporelle des débits des camions lourds peut être améliorée en utilisant le jeu de données du réseau de camionnage (<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/reseau-camionnage>), qui renseigne les routes et les plages horaires où les véhicules lourds ont l'autorisation de circuler ou non (Ministère des Transports et de la Mobilité durable, 2025). En effet, la réglementation sur la circulation des véhicules lourds a une incidence sur les routes et les moments de la journée pour lesquels

les facteurs d'ajustement des camions de l'intersection Marcel-Laurin/Thimens peuvent être appliqués.

De plus, disposer pour les données de comptage d'une plus grande couverture temporelle sur d'autres routes que les autoroutes permettrait d'évaluer avec une plus grande qualité les débits qui y sont estimés. En effet, pour les autres routes que les autoroutes, les débits horaires estimés, qui représentent un volume horaire moyen d'un certain jour de semaine et mois spécifiques, sont comparés aux comptages aux intersections collectés pour une seule date, et qui par conséquent ne représentent pas forcément un débit représentatif du jour et du mois considéré, surtout en cas d'événements particuliers (travaux ou tempête de neige par exemple). Une alternative pour évaluer les débits estimés pourrait être de les comparer à des données télématiques. Par ailleurs, les DJMA ne peuvent être évalués que pour des sections d'autoroute et non pour d'autres types de routes, en raison de l'absence de sites permanents sur ces dernières.

L'évaluation des débits est également limitée par le nombre de sections de route comparées, en raison du manque de volumes de véhicules en sortie du modèle AIMSUN sur certains segments routiers. Les MAPE des DJMA sont par exemple déterminés à partir d'un nombre très faible de sections de route ($n = 3$).

4.2.3 Estimation et évaluation des émissions

L'estimation des émissions repose sur plusieurs hypothèses. La composition du parc de véhicules repose sur les véhicules immatriculés dans la région administrative de Montréal, ainsi que sur la flotte des autobus de la STM. Par conséquent, on suppose que la flotte de véhicules circulant dans l'arrondissement de Saint-Laurent suit la même composition que celle de Montréal. De plus, en raison du manque d'information sur les types de carburant des véhicules dans le jeu de données de la SAAQ, la composition du parc de véhicules utilisée repose sur les véhicules immatriculés en 2017, et non 2013. Bien que les modèles de véhicules postérieurs à 2013 aient été exclus, cela constitue une source d'incertitude supplémentaire.

Concernant les consommations de carburant des camions réguliers et des camions lourds hybrides, il est supposé que celles-ci correspondent à celles des camions réguliers et des camions lourds à essence respectivement. Cette hypothèse mène à une surestimation des émissions, les consommations moyennes de carburant des véhicules hybrides étant probablement inférieures à celles des véhicules traditionnels. Cependant, au vu de la part des camions hybrides parmi le parc des camions réguliers et des camions lourds, à savoir 0,01 % pour chacun de ces types de camions, l'effet est minime.

La moyenne journalière pour l'année des émissions est comparée aux émissions rapportées dans l'inventaire 2017 de l'arrondissement de Saint-Laurent, en divisant la valeur annuelle de l'inventaire par 365. Cela suppose que tous les jours sont identiques et prend en considération des journées qui pourraient être considérées comme anormales en termes de circulation (vacances par exemple). Or, la moyenne journalière des émissions estimée est dérivée des DJMA, qui normalement n'incluent pas les journées anormales, bien qu'ici pour les raisons évoquées précédemment concernant la détermination des facteurs d'ajustement, cela puisse être le cas. Ainsi, en théorie, la journée moyenne en termes de circulation représentée par les DJMA (DJMA utilisés pour déterminer la moyenne journalière des émissions), et celle découlant de l'inventaire de l'arrondissement en divisant sa valeur annuelle par 365 ne sont pas les mêmes, ce qui compromet la comparaison.

Enfin, certains paramètres influençant les émissions ne sont pas pris en compte, comme la température, la congestion ou la vitesse. Une amélioration serait donc d'inclure ces paramètres dans la modélisation des émissions. Pour conserver la résolution spatio-temporelle de l'inventaire, cela nécessite de connaître leur variation dans le temps et dans l'espace. L'utilisation de données télématiques pourrait permettre d'estimer la vitesse et comment elle varie dans le temps, dépendamment des conditions de circulation. Une autre possibilité pour inclure la vitesse serait d'établir une relation entre débit et vitesse. Li et al. (2020) ont par exemple établi une relation entre débit et vitesse moyenne sur un intervalle de temps donné, en supposant que tous les véhicules d'une même section de route ont la même vitesse, que les véhicules maintiennent la même distance entre eux, et que la vitesse maximale est celle de la limite de vitesse maximale

autorisée (Li, Lv, Yang, Liu & Liu, 2020). L'approche utilisée par Ganji et al. (2020) pour établir une relation entre les débits routiers estimés et les vitesses moyennes des segments routiers est d'entraîner un réseau de neurones artificiels pour imiter les données de sortie d'un modèle de circulation (Ganji *et al.*, 2020). De plus, l'estimation des vitesses avec la même résolution que les débits permettrait d'utiliser MOVES pour quantifier les émissions GES et par conséquent d'obtenir une modélisation des émissions plus détaillée.

4.3 Intégration à la Carte Carbone de Montréal

Le projet de recherche s'inscrit dans le projet plus global de Carte Carbone. L'intégration du travail réalisé dans le cadre du projet de maîtrise au sein de la Carte Carbone est discutée ici.

4.3.1 Mise à jour des données

Le temps nécessaire au traitement des données de l'enquête O-D constraint à utiliser un modèle de circulation correspondant à 2013 et les résultats présentés ici concernent donc une situation qui n'est plus forcément actuelle. En effet, la dernière enquête de mobilité montre un changement dans les comportements en mobilité suite à la pandémie, avec notamment la démocratisation du télétravail, impliquant moins de déplacements pour travailler. Un lissage de l'achalandage des réseaux est observé, affectant le profil temporel de la circulation (ARTM, 2024). De plus, l'augmentation du parc de véhicules (hausse de 10 % entre 2013 et 2022 pour la région administrative de Montréal d'après les données de la SAAQ) et la hausse du poids des véhicules observé ces dernières années jouent sur les émissions du transport routier. Une mise à jour des données pour faire correspondre l'inventaire à résolution spatio-temporelle avec la situation actuelle est donc nécessaire pour élaborer des stratégies de réduction pertinentes. Le code développé pour appliquer la méthodologie présentée dans ce mémoire facilite la mise à jour des résultats avec des données plus récentes puisque les calculs sont automatisés.

Les plus récents comptages aux intersections dans les données ouvertes de la Ville de Montréal différencient les camions porteurs des camions lourds, laissant envisager l'élaboration de facteurs

d'ajustement plus spécifiques à ces types de véhicules dans le cas d'une mise à jour de la carte, à condition de disposer d'au moins 84 jours de comptages.

4.3.2 Intégration des autres arrondissements

Afin de faciliter le développement méthodologique, la présente étude s'est concentrée sur un seul arrondissement de Montréal. Cependant, le SUM crée une modélisation de la circulation de la Ville de Montréal au complet. La modélisation de la Ville de Montréal au complet pourrait être utilisée pour construire l'inventaire des émissions de GES du transport routier à haute résolution spatio-temporelle de Montréal en appliquant la méthodologie développée ici. Cependant, étendre la méthodologie aux autres arrondissements nécessite d'étudier le besoin de développer des facteurs d'ajustement propres aux autres arrondissements ou non, en vérifiant si les profils de circulation déterminés pour l'arrondissement de Saint-Laurent sont similaires aux autres routes du territoire de la Ville de Montréal.

4.3.3 Combinaison avec la modélisation de scénarios de réduction

La Carte Carbone vise à être un outil de sensibilisation pour la population et un outil d'aide à la décision. Outre l'objectif de résolution spatio-temporelle de la carte, un autre objectif est de modéliser des scénarios de réduction. La réalisation de cet objectif a été étudiée par Marie-Alice Porta, dont le mémoire de maîtrise sera soumis à l'été 2025. Pour modéliser des scénarios de réduction, elle propose de modifier les données d'entrée du modèle AIMSUN. Ainsi, la réalisation de cartes à haute résolution spatio-temporelle permettant de visualiser des scénarios de réduction pourrait se dérouler ainsi :

1. Modification des données d'entrée du modèle AIMSUN pour modéliser un scénario de réduction donné,
2. Lancement de la simulation AIMSUN et récupération des données de sortie,
3. Extrapolation temporelle des débits,
4. Détermination des vitesses moyennes à haute résolution spatio-temporelle,

5. Intégration dans MOVES des débits et des vitesses, en plus d'autres données pertinentes (composition du parc de véhicules, données météorologiques).

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'objectif principal de cette recherche est de proposer une méthode pour quantifier les émissions de GES du transport routier à haute résolution spatio-temporelle pour le projet de Carte Carbone de Montréal de la Chaire de recherche du Canada sur la mesure de l'impact des activités humaines sur les changements climatiques. Sous forme de carte numérique disponible en ligne, l'objectif de la Carte Carbone est d'être un outil de sensibilisation pour la population et un outil d'aide à la décision pour identifier des mesures de réduction. L'étude dans ce mémoire s'est limitée à l'arrondissement de Saint-Laurent pour faciliter le développement méthodologique. En réponse à la question initiale, une méthodologie reposant sur une approche ascendante combinant le modèle de circulation AIMSUN du SUM, des facteurs d'ajustement de la circulation déterminés à partir de données de comptages routiers, la composition du parc de véhicules, des consommations de carburant moyennes et des facteurs d'émission est proposée.

Les résultats d'évaluation des débits estimés avec des volumes routiers historiques relevés en conditions réels montrent que les estimations sont correctes et reproduisent les variations temporelles observées. La démarche proposée permet de représenter l'évolution des émissions de gaz à effet de serre du transport routier sur une année avec une résolution temporelle horaire et journalière à l'échelle de sections de route. Les émissions de GES peuvent être visualisées pour différents types de véhicules (véhicules légers particuliers, commerciaux, camions réguliers, camions lourds et autobus).

Le travail réalisé contribue à la réalisation de la Carte Carbone en proposant une première méthodologie pour permettre sa haute résolution spatio-temporelle. L'utilisation de facteurs d'ajustement pour extrapoler temporellement des débits routiers est courante mais a l'avantage d'être simple dans son application et de reposer sur des données accessibles publiquement. L'analyse sur le territoire étudié a montré l'importance de développer des facteurs d'ajustement propres aux types de route, aux types de véhicules et selon l'heure, le jour et le mois considéré. La

création de codes informatiques dans le cadre de ce travail permet d’automatiser l’extrapolation des débits en sortie du modèle AIMSUN, leur évaluation et la quantification des émissions de GES à haute résolution spatio-temporelle et de faciliter la mise à jour des résultats avec des données plus récentes.

Certaines limites sont à considérer dans le travail réalisé. La méthodologie développée repose entre autres sur les données de l’enquête de mobilité sur la région métropolitaine de Montréal qui est réalisée tous les cinq ans et dont le traitement est long avant d’aboutir à un modèle de circulation. Elle se base également sur des données de comptage, dont la couverture temporelle doit être suffisante pour déterminer des facteurs d’ajustement sur 84 jours, couverture temporelle actuellement non présente dans les données de comptage de la Ville de Montréal. La mise à jour de la carte reste donc dépendante de ces données. De plus, la couverture temporelle restreinte des données de comptage des routes non classées comme des autoroutes, limite l’exploration de profils temporels, et constraint d’appliquer un même profil temporel, défini par l’intersection Marcel-Laurin/Thimens, à la majeure partie des routes. La méthode comporte également des incertitudes causées par des différences dans les définitions des types de véhicules entre les jeux de données utilisés. D’autres incertitudes sont causées par la demande en transport des véhicules commerciaux, qui est d’une part dérivée de données synthétiques et non empiriques, et qui sont agrégées dans le modèle. Enfin, l’inclusion de certains facteurs influençant les émissions comme la vitesse, la congestion, le style de conduite ou les conditions météorologiques n’a pas été explorée dans ce mémoire.

Pour aller plus loin, étudier les profils temporels des volumes routiers sur plusieurs routes en fonction des spécificités de ces dernières serait utile pour vérifier la validité d’appliquer un même profil temporel à plusieurs sections de route comme ce qui a été fait ici avec l’intersection Marcel-Laurin/Thimens, et également pour élargir l’application de la méthode aux autres arrondissements de Montréal en vue de la création de la Carte Carbone. De plus, introduire dans

la méthode d'autres paramètres qui influencent les émissions et qui varient spatio-temporellement, comme la vitesse, pourrait être étudié pour renforcer la précision des résultats d'émission. De plus, d'autres techniques reposant sur des modèles mathématiques plus complexes existent pour estimer des volumes routiers à haute résolution spatio-temporelle, et sous condition de disposer des données nécessaires, leur utilisation pourrait être étudiée et comparée à la démarche présentée dans ce mémoire à l'aide des scores de performance employés ici. L'utilisation de données télématicques pourrait également être explorée en vue de débloquer les limites constatées dans ce mémoire concernant la prise en compte des vitesses et le manque de données de comptage à certains endroits. Enfin, pour intégrer l'objectif de modélisation de scénarios de réduction de la Carte Carbone afin d'en faire un outil de sensibilisation et d'aide à la décision, la combinaison du présent projet avec celui de Marie-Alice Porta pourra être étudiée.

ANNEXE I

DÉTAIL DU CONTENU DES JEUX DE DONNÉES RELATIFS AUX DÉBITS DE CIRCULATION DES ROUTES GÉRÉES PAR LE MTMD

Le tableau-A I-1 renseigne les différentes temporalités des débits disponibles dans les rapports annuels des sites permanents du MTMD (Ministère des Transports et de la Mobilité durable, 2024b). Les rapports annuels des sites permanents sont disponibles sous forme de classeurs Excel en cliquant sur les sites permanents de la carte interactive du jeu de données "Débit de circulation" de la plateforme Données Québec (<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/debit-de-circulation>). Ces classeurs Excel contiennent les onglets présentés dans le tableau-A I-1.

Tableau-A I-1 Contenu des fichiers Excel relatifs aux débits de circulation fournis par le MTMD
D'après les données du ministère des Transports et de la Mobilité durable (2024b, p. 6)

Onglet	Type de débit
histo	DJMA Débit journalier moyen estival (DJME) Débit journalier moyen hivernal (DJMH)
djmm	Débit journalier moyen mensuel
horaire	Débit horaire moyen pour les dimanches, samedis et jours ouvrables
fact84	Débits journaliers moyens par jour de semaine par mois de tous les véhicules
fact84_cam	Débits journaliers moyens par jour de semaine par mois pour les véhicules lourds
hre_pointes	Débit horaire par date et heure Nota bene : malgré l'appellation de l'onglet, cette feuille contient tous les débits horaires collectés sur l'année, et pas seulement les débits sur les heures de pointe. Ils sont seulement triés par débit décroissant.

ANNEXE II

SYNTHÈSE DES DONNÉES DE CIRCULATION DISPONIBLES À MONTRÉAL

Le tableau-A II-1 synthétise les principales informations concernant les données disponibles pour Montréal. Comme les données télématiques peuvent provenir de plusieurs compagnies et qu'elles ne sont pas accessibles dans le cadre de cette étude, leurs renseignements ne sont pas intégrés au tableau.

Tableau-A II-1 Synthèse des données de circulation disponibles
dans le contexte montréalais

Source de données	Nom	Accessible en ligne	Type de donnée
Modèle de circulation	Débits en sortie du modèle AIMSUN de l'arrondissement de Saint-Laurent	Non	Débit de véhicules
Relevés de circulation	Comptages des véhicules, cyclistes et piétons aux intersections munies de feux de circulation	Oui	Débits de véhicules
	Débits de circulation du réseau du MTMD	Oui	Débits de véhicules
	Tableau de bord des flux de circulation	Oui	Débits de véhicules
Autre	Données MTL Trajet	Oui	Coordonnées GPS des trajets des usagers

Source de données	Nom	Types de routes couvertes	Couverture temporelle
Modèle de circulation	Débits en sortie du modèle AIMSUN de l'arrondissement de Saint-Laurent	Toutes	Journée ouvrable moyenne d'automne (2013) sur l'heure de pointe du matin (7-8 h) et du soir (16-17 h)
Relevés de circulation	Comptages des véhicules, cyclistes et piétons aux intersections munies de feux de circulation	- Rues locales - Collectrices - Artères principales - Artères secondaires Boulevard Marcel-Laurin : Artère principale Boulevard Thimens : Collectrice	- Depuis 2008 - Rarement plus de 3 jours/an pour une intersection donnée - Exception pour l'intersection Marcel-Laurin/Thimens entre mai 2015 et mai 2016
		Autoroutes	Dix dernières années disponibles en ligne
	Tableau de bord des flux de circulation	- Rues locales - Collectrices - Artères principales - Artères secondaires	Depuis 2022
Autre	Données MTL Trajet	Toutes	Collecte des données sur un mois (2016 et 2017)

Source de données	Nom	Résolution temporelle	Types de véhicules couverts
Modèle de circulation	Débits en sortie du modèle AIMSUN de l'arrondissement de Saint-Laurent	/h /10 min	Matrice O-D "voiture" : - Véhicules légers particuliers - Véhicules légers commerciaux - Camions réguliers (porteurs) Matrice O-D "camion" : - Camions lourds (remorques) Bus de la STM
Relevés de circulation	Comptages des véhicules, cyclistes et piétons aux intersections munies de feux de circulation	/15 min	Automobiles, camions, bus, motos
	Débits de circulation du réseau du MTMD	/h DJMA : /j	Tous, sans distinction des types de véhicules
	Tableau de bord des flux de circulation	Échantillon d'une journée	Tous, sans distinction des types de véhicules
Autre	Données MTL Trajet		Donnée rentrée par l'utilisateur de l'application

ANNEXE III

CODES PYTHON

La figure-A III-1 présente la structure des fichiers python créés. Les fichiers sont téléchargeables ici : https://github.com/e-audrey/carte_carbone_transport_hr.

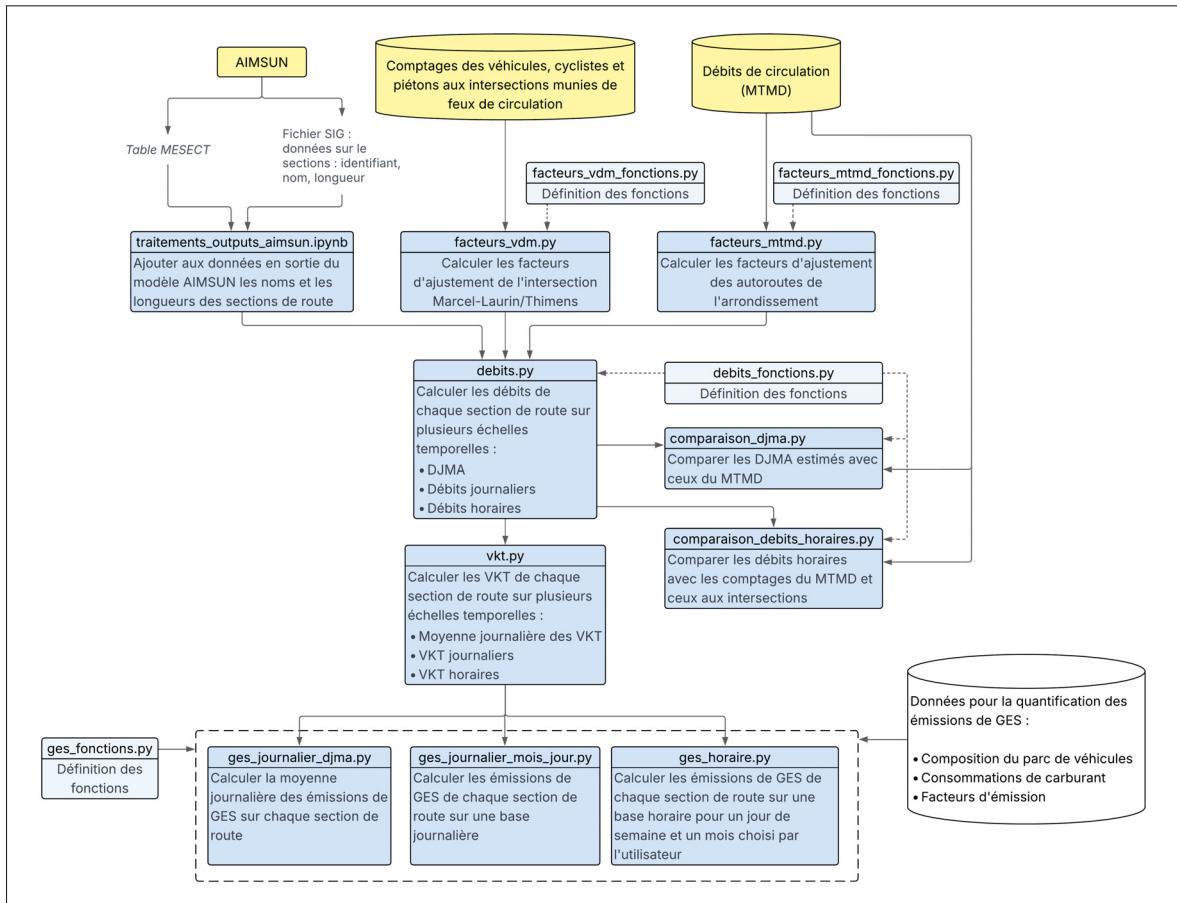


Figure-A III-1 Structure des codes python créés

ANNEXE IV

COMPARAISON DES FLOTTES DE VÉHICULES

Le tableau-A IV-1 indique la composition de la flotte de véhicules simulés dans le modèle AIMSUN d'après les débits de chaque type de véhicule obtenus en sortie des quatre simulations disponibles dans le modèle. Les valeurs indiquées représentent la moyenne des pourcentages des quatre simulations.

Les tableaux-A IV-2 et IV-3 montrent respectivement les pourcentages des types de véhicules immatriculés en 2013 à Montréal d'après les données de la SAAQ et les pourcentages des types de véhicules comptés en 2013 aux intersections munies de feux de circulation à Montréal d'après les données ouvertes (SAAQ, 2023b; Ville de Montréal, 2025a). Les données de la SAAQ ont été filtrées pour la région administrative de Montréal et toutes les intersections relevées en 2013 sur l'île de Montréal sont prises en compte pour les données des comptages aux intersections.

Les pourcentages des tableaux IV-2 et IV-3 sont calculés en ne prenant en compte que les véhicules qui s'apparentent aux véhicules modélisés dans AIMSUN, à savoir des véhicules légers, des camions et des bus. Les définitions des types de véhicules selon les sources de données sont indiquées dans l'annexe VII. Sachant que la matrice "voiture" du modèle AIMSUN comprend les véhicules légers particuliers, les véhicules légers commerciaux et les camions réguliers, que la matrice "camions" représente les camions lourds et que les camions des données de la SAAQ et des données de comptage aux intersections peuvent comprendre les camions porteurs et les camions lourds, la flotte modélisée ressemble à celle issue des véhicules immatriculés et des données de comptage.

Tableau-A IV-1 Flotte modélisée
dans AIMSUN d'après les données en
sortie des quatre simulations

Type de véhicule	Pourcentage (%)
Voitures	97,79
Camion	1,57
Bus	0,64

Tableau-A IV-2 Proportions des types de véhicules
immatriculés en 2013 à Montréal
D'après les données de SAAQ (2023b)

Type de véhicule	Pourcentage (%)
PAU : Automobile ou camion léger, de promenade	84,93
CAU : Automobile ou camion léger, utilisation institutionnelle, professionnelle ou commerciale	11,96
BCA : Camion ou tracteur routier, utilisation institutionnelle, professionnelle ou commerciale	2,83
TAB : Autobus, utilisation institutionnelle, professionnelle ou commerciale	0,29

Tableau-A IV-3 Proportions des types de véhicules comptés aux intersections munies de feux de circulation en 2013
D'après les données de Ville de Montréal (2025a)

Type de véhicule	Pourcentage (%)
Autos	95,23
Camions	3,41
Bus	1,36

ANNEXE V

FACTEURS D'AJUSTEMENT ET EXEMPLES DE CALCUL DE DJMA

Le but de la présente annexe est d'indiquer les facteurs d'ajustement calculés : facteurs horaires pour les mois d'automne les jours ouvrables (tableau A-V-1), facteurs jours-heures (V-2 et V-3), et facteurs mois-jours (tableaux A-V-4 et V-5). Pour l'intersection Marcel-Laurin/Thimens, trois tableaux pour chaque type de facteur sont réalisés, chacun correspondant à un type de véhicule (automobiles, camions et bus), mais pour synthétiser, seuls les tableaux des automobiles sont présentés ici.

Les facteurs d'ajustement de la circulation permettent d'estimer le DJMA à partir du volume de véhicules pour une heure de pointe et une journée ouvrable d'automne en sortie du modèle AIMSUN. Un facteur horaire est d'abord appliqué au volume de l'heure de pointe pour estimer le débit journalier d'une journée ouvrable d'automne, puis le DJMA est calculé en utilisant un facteur mois-jour. Les facteurs mois-jours comportent plusieurs valeurs de facteurs pour les journées ouvrables d'automne (mis en valeur en gras dans les tableaux V-5 et V-4). Trois valeurs de DJMA sont calculées pour chaque section de route : une première en utilisant la valeur moyenne du facteur considéré sur la plage temporelle correspondante d'une journée ouvrable d'automne, une deuxième avec la valeur maximale de la plage, et une troisième avec la valeur minimale.

Exemple de calcul de DJMA

On suppose qu'on ait sur section d'autoroute un volume de 2 484 véhicules entre 7 et 8 h, d'après les données de sortie du modèle AIMSUN. D'après le tableau-A V-1, la valeur du facteur horaire à 7 h pour les autoroutes est 0,053. Le facteur mois-jour moyen en automne les jours ouvrables vaut 1,066, tandis que les valeurs minimale et maximale pour ce même facteur sur la plage temporelle d'automne les jours de semaine sont 1,002 et 1,138 respectivement. Le DJMA vaudrait donc sur cette section d'après l'équation A V-1 :

$$DJMA = \frac{2\ 484}{0,053 \times 1,066} = 43\ 966 \text{ véhicules/j} \quad (\text{A V-1})$$

En utilisant la valeur maximale du facteur mois-jour, on calculerait la valeur minimale du DJMA :

$$DJMA = \frac{2\ 484}{0,053 \times 1,002} = 46\ 774 \text{ véhicules/j} \quad (\text{A V-2})$$

Tableau-A V-1 Facteurs horaires pour les journées ouvrables en automne

Heure	Autoroutes MTMD	Marcel-Laurin/Thimens
0	0,015	0,006
1	0,009	0,003
2	0,006	0,002
3	0,007	0,002
4	0,011	0,004
5	0,032	0,015
6	0,045	0,037
7	0,053	0,066
8	0,055	0,077
9	0,053	0,054
10	0,053	0,047
11	0,055	0,050
12	0,057	0,056
13	0,059	0,054
14	0,066	0,065
15	0,067	0,077
16	0,066	0,089
17	0,063	0,089
18	0,055	0,065
19	0,045	0,044
20	0,038	0,034
21	0,036	0,028
22	0,031	0,019
23	0,024	0,016

Tableau-A V-2 Facteurs jour-heure issus des comptages du MTMD sur les autoroutes tous types de véhicules confondus

Heure	Dimanche	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi
0	0,029	0,010	0,011	0,012	0,012	0,013	0,022
1	0,019	0,006	0,006	0,006	0,007	0,008	0,014
2	0,012	0,004	0,004	0,005	0,005	0,006	0,010
3	0,011	0,005	0,005	0,005	0,006	0,007	0,010
4	0,009	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,009
5	0,010	0,039	0,040	0,039	0,039	0,035	0,013
6	0,014	0,055	0,056	0,055	0,054	0,050	0,020
7	0,020	0,063	0,064	0,064	0,062	0,059	0,029
8	0,028	0,062	0,063	0,063	0,061	0,058	0,041
9	0,043	0,055	0,057	0,056	0,055	0,052	0,051
10	0,057	0,052	0,051	0,051	0,050	0,051	0,059
11	0,065	0,052	0,051	0,051	0,051	0,053	0,063
12	0,070	0,054	0,053	0,053	0,052	0,056	0,066
13	0,073	0,056	0,055	0,055	0,054	0,057	0,067
14	0,074	0,066	0,065	0,065	0,064	0,064	0,069
15	0,075	0,068	0,066	0,066	0,064	0,063	0,070
16	0,073	0,067	0,066	0,065	0,063	0,062	0,069
17	0,068	0,065	0,063	0,063	0,061	0,059	0,067
18	0,056	0,056	0,056	0,056	0,055	0,054	0,054
19	0,050	0,042	0,043	0,043	0,045	0,047	0,043
20	0,048	0,035	0,035	0,036	0,039	0,039	0,038
21	0,042	0,031	0,032	0,034	0,036	0,037	0,039
22	0,033	0,025	0,027	0,028	0,029	0,032	0,042
23	0,022	0,019	0,020	0,021	0,023	0,027	0,037

Tableau-A V-3 Facteurs jour-heure des automobiles issus des comptages
à l'intersection Marcel-Laurin/Thimens

Heure	Dimanche	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi
0	0,019	0,006	0,006	0,006	0,006	0,007	0,015
1	0,011	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,009
2	0,008	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,006
3	0,006	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,005
4	0,005	0,004	0,004	0,003	0,004	0,004	0,004
5	0,006	0,016	0,016	0,015	0,015	0,014	0,006
6	0,010	0,038	0,038	0,037	0,036	0,033	0,011
7	0,014	0,068	0,066	0,067	0,063	0,059	0,019
8	0,027	0,079	0,078	0,078	0,075	0,069	0,037
9	0,048	0,054	0,055	0,056	0,053	0,050	0,057
10	0,065	0,047	0,047	0,045	0,046	0,046	0,071
11	0,074	0,050	0,049	0,051	0,052	0,052	0,077
12	0,085	0,056	0,055	0,057	0,055	0,060	0,082
13	0,084	0,054	0,052	0,050	0,052	0,058	0,080
14	0,085	0,065	0,063	0,059	0,061	0,069	0,078
15	0,084	0,081	0,080	0,079	0,078	0,073	0,077
16	0,080	0,090	0,089	0,092	0,087	0,084	0,074
17	0,075	0,090	0,089	0,092	0,089	0,083	0,070
18	0,057	0,063	0,066	0,065	0,067	0,064	0,057
19	0,047	0,042	0,044	0,044	0,048	0,049	0,044
20	0,039	0,033	0,035	0,034	0,038	0,040	0,036
21	0,032	0,026	0,028	0,028	0,030	0,033	0,032
22	0,024	0,018	0,019	0,019	0,020	0,023	0,028
23	0,016	0,015	0,016	0,015	0,016	0,021	0,024

Tableau-A V-4 Facteurs mois-jour issus des comptages du MTMD sur les autoroutes, tous types de véhicules compris

Mois	Dimanche	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi
Janvier	0,712	0,942	0,977	0,994	1,017	1,051	0,796
Février	0,724	0,979	1,016	1,009	1,025	1,072	0,803
Mars	0,769	1,008	1,033	1,058	1,062	1,097	0,864
Avril	0,799	1,033	1,071	1,082	1,094	1,133	0,917
Mai	0,826	1,043	1,085	1,098	1,125	1,151	0,925
Juin	0,822	1,060	1,078	1,109	1,122	1,155	0,937
Juillet	0,849	1,046	1,084	1,112	1,126	1,135	0,894
Août	0,814	1,051	1,058	1,097	1,105	1,118	0,898
Septembre	0,808	1,046	1,072	1,086	1,101	1,138	0,904
Octobre	0,775	1,036	1,071	1,085	1,098	1,117	0,879
Novembre	0,758	1,006	1,033	1,045	1,060	1,091	0,881
Décembre	0,759	1,002	1,020	1,044	1,062	1,100	0,865

Tableau-A V-5 Facteurs mois-jour des automobiles issus des comptages à l'intersection Marcel-Laurin/Thimens

Mois	Dimanche	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi
Janvier	0,645	0,975	0,978	0,994	1,022	1,096	0,789
Février	0,668	0,973	0,992	1,023	1,068	1,081	0,811
Mars	0,713	1,029	1,052	1,074	1,108	1,122	0,881
Avril	0,769	1,025	1,087	1,094	1,144	1,151	0,913
Mai	0,723	1,059	1,070	1,100	1,123	1,121	0,869
Juin	0,749	1,079	1,094	1,107	1,160	1,161	0,890
Juillet	0,661	1,028	1,065	1,100	1,093	1,067	0,746
Août	0,691	1,027	1,071	1,087	1,117	1,094	0,776
Septembre	0,718	1,048	1,138	1,112	1,162	1,193	0,832
Octobre	0,742	1,052	1,112	1,130	1,132	1,198	0,898
Novembre	0,739	1,079	1,044	1,146	1,148	1,146	0,894
Décembre	0,715	1,050	1,078	1,063	1,140	1,177	0,912

ANNEXE VI

COMPARAISON DES DÉBITS HORAIRES ESTIMÉS AVEC LES COMPTAGES AUX INTERSECTIONS

L'utilisation des données de comptage aux intersections nécessite d'associer les approches des intersections avec les sections de route modélisées dans AIMSUN. Pour faciliter cette tâche, le SUM a fourni un tableur renseignant pour chaque section de route du modèle AIMSUN, les identifiants des intersections auxquelles la section de route est reliée, ainsi que la direction associée (nord, sud, est, ouest) en précisant si la section considérée est une approche entrante ou sortante pour les deux intersections qu'elle relie.

Dans les données des comptages aux intersections, le à une intersection donnée, nombre de véhicules est compté selon la direction vers laquelle les véhicules se dirigent (nord, sud, est ou ouest), et le virage effectué (virage à gauche, à droite ou tout droit). Les comptages pour chaque intersection sont notés NBLT, NBT, NBRT, SBLT, SBT, SBRT, EBLT, EBT, EBRT, WBLT, WBT et WBRT, tels qu'un véhicule allant vers le nord et tournant à gauche est comptabilisé dans les comptages "NBLT", "NBT" s'il va tout droit, et "NBRT" s'il tourne à droite (Ville de Montréal, 2025a). Ainsi, seuls les véhicules issus des approches entrantes des intersections peuvent être déterminés.

Pour attribuer un comptage de véhicules aux sections de route, la procédure utilisée est la suivante :

1. Pour chaque intersection, on calcule la somme des comptages d'une direction donnée. Par exemple, l'approche entrante qui va vers le nord de l'intersection considérée a un nombre de véhicules comptés valant NB , avec $NB = NBLT + NBT + NBRT$:
2. Pour chaque section de route, il lui est alloué le comptage de l'intersection pour laquelle la section constitue son approche entrante. Par exemple, dans le cas où une section de route s avec comme direction le nord est l'approche entrante de l'intersection i , le comptage alloué à la section de route s est la valeur NB calculée en 1.

ANNEXE VII

DÉFINITIONS DES TYPES DE VÉHICULES SELON LES SOURCES DE DONNÉES

Le tableau-A VII-1 résume les définitions pour les différents types de véhicules de plusieurs sources dont les données ont été utilisées dans le cadre de la présente étude. Il est à noter qu'un changement de définition pour les véhicules lourds a été effectué au Québec à partir du 1^{er} janvier 2009 d'après la *Loi concernant les propriétaires, les exploitants et les conducteurs de véhicules lourds* (PEVL). Avant le 1^{er} janvier 2009, la définition se reposait sur la masse nette, qui représente le poids du véhicule sans chargement. Celle-ci devait excéder 3 000 kg pour qu'un véhicule routier soit considéré comme un véhicule lourd. Après le 1^{er} janvier 2009, le PNBV, qui correspond à la somme du poids du véhicule et sa capacité de chargement, et un véhicule routier est considéré comme un véhicule lourd au sens de la Loi PECVL si son PNBV est supérieur à 4 500 kg (Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports, 2017).

Tableau-A VII-1 Définition des types des véhicules dans les sources de données utilisées

Source de données	Type de véhicule	Définition	Grandeur caractéristique	Source
Modèle AIMSUN	Véhicules légers particuliers (vlp)	Transport personnel (autos privées, taxis ou motos)	Longueur inférieure ou égale à 6 m	Modélisation AIMSUN
	Véhicules légers commerciaux (vlc)	Avec lettrage	Longueur inférieure ou égale à 6 m	
	Camions réguliers (vrg)	Camions porteurs, avec unité simple. Véhicules récréatifs ou autobus	Longueur comprise entre 6 et 12 m	
	Véhicules lourds (vlo)	Camions remorques, avec multiples unités ou véhicules très lourds et lents	Longueur supérieure à 12 m	
	Bus (bus)	Bus de la STM		

Source de données	Type de véhicule	Définition	Grandeur caractéristique	Source
Véhicules en circulation (SAAQ)	PAU : Automobile ou camion léger (utilisation de promenade)	"Véhicule routier : - de 3 000 kg ou moins dont la fonction principale est le transport de passagers et dont la construction n'est pas sur un châssis de camion ; - de 4 000 kg ou moins de type fourgonnette, camionnette ou véhicule tout usage (4x4)."	Masse nette	(SAAQ, 2023a)
	CAU : Automobile ou camion léger (Utilisation institutionnelle, professionnelle ou commerciale)	Même définition que PAU	Masse nette	
	BCA : Camion ou tracteur routier	"Véhicule routier de plus de 3 000 kg conçu spécialement pour le transport de biens. Ce véhicule est immatriculé selon le nombre maximal d'essieux que peuvent comprendre l'unité tracteur et toutes remorques s'y rattachant."	Masse nette	
	TAB : Autobus	"Autobus ou minibus : - public interurbain ; - servant régulièrement au transport de personnes, sans rémunération ; - public urbain."		

Source de données	Type de véhicule	Définition	Grandeur caractéristique	Source
CURB		Pas d'indication		(The World Bank, 2016)
Secteur des transports Québec Tableau 37 : Variables explicatives des camions (RNCAN)		Pas d'indication		(RNCAN, 2024b)
Enquête 2009 sur les véhicules au Canada (RNCAN)	Camion lourd	Véhicule avec un poids brut égal ou supérieur à 15 tonnes	Poids brut supérieur à 15 tonnes	(RNCAN, 2011)

ANNEXE VIII

ESTIMATION DES ÉMISSIONS JOURNALIÈRES À PARTIR DE L'INVENTAIRE 2017 DE L'ARRONDISSEMENT DE SAINT-LAURENT

L'inventaire 2017 de l'arrondissement de Saint-Laurent fournissant une valeur annuelle des émissions, et la méthode développée dans ce mémoire permettant d'estimer une moyenne journalière pour l'année des émissions, une valeur moyenne journalière pour 2017 des émissions est déduite à partir de l'inventaire traditionnel dans un but de comparaison. Le tableau 17 de l'inventaire 2017 indique les émissions annuelles des déplacements sur route (équivalent au transport routier), soit 227 830 t éq. CO₂ (Boutin & Tacquet, 2018). D'après l'équation 2.15, la moyenne journalière des émissions correspondante est 624 t éq. CO₂.

L'inventaire renseigne avec la figure 12 la contribution des différents moyens de transport dans les émissions du secteur du transport, y compris les véhicules hors route, le train et le métro (Boutin & Tacquet, 2018). Pour comparer les contributions des moyens de transport routier seulement (automobiles, camions légers, autobus et camions lourds), les émissions annuelles de chaque moyen de transport sont d'abord estimées à partir des contributions de la figure 12 et de la valeur des émissions du transport (239 530 t éq. CO₂). La moyenne des émissions journalières de chaque mode de transport en est ensuite déduite de avec l'équation 2.15 avant de déterminer les contributions. Le tableau VIII-1 synthétise les émissions de chaque mode de transport déduites des données de l'inventaire 2017.

On constate dans le tableau VIII-1 qu'avec la procédure réalisée, en effectuant la somme des émissions annuelles de chaque mode de transport routier, le total des émissions du transport routier vaudrait 227 554 t éq. CO₂, plutôt que 227 830 t éq. CO₂ comme indiqué dans le tableau 17 de l'inventaire. Cette différence est sûrement due à l'arrondissement des contributions de chaque mode de transport indiquées dans la figure 12.

Tableau-A VIII-1 Émissions selon le moyen de transport à partir de l'inventaire
2017 de Saint-Laurent

Mode de transport	Contribution au secteur du transport (Figure 12)	Émissions annuelles (t éq. CO₂)	Moyenne journalière des émissions	Contribution au secteur du transport routier
Automobiles	35 %	83 836	230	37 %
Camions légers	25 %	59 883	164	26 %
Autobus	3 %	7 186	20	3 %
Camions lourds	32 %	76 650	210	34 %
<i>Total</i>		227 830	227 830/365	
<i>Transport routier</i>		(Tableau 17)	= 624	100 %
Véhicules hors route	3 %	7 186		
Train	2 %	4 791		
Métro	0 %	0		
<i>Total Transport</i>	100 %	239 530 (Tableau 17)		

LISTE DE RÉFÉRENCES

- Abou-Senna, H., Radwan, E., Westerlund, K. & Cooper, C. D. (2013). Using a traffic simulation model (VISSIM) with an emissions model (MOVES) to predict emissions from vehicles on a limited-access highway. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 63(7), 819–831. doi : 10.1080/10962247.2013.795918. Publisher : Taylor & Francis.
- Aimsun. (2024). *Aimsun Next 24 User's Manual* (éd. Aimsun Next 24.0.0). Barcelona, Spain. Repéré à <https://docs.aimsun.com/next/24.0.0>.
- Aimsun Next Users Manual. (2024a). Output Database Definition. Repéré le 2024-12-05 à <https://docs.aimsun.com/next/22.0.1/UsersManual/OutputDatabaseDefinition.html#instantaneous-emission-model>.
- Aimsun Next Users Manual. (2024b). Simulation Process. Mesoscopic Simulation. Repéré le 2024-12-04 à <https://docs.aimsun.com/next/22.0.1/UsersManual/MesoDiscreteSimulation.html>.
- Alfaseeh, L., Tu, R., Farooq, B. & Hatzopoulou, M. (2020). Greenhouse Gas Emission Prediction on Road Network using Deep Sequence Learning. *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, 88, 102593. doi : 10.1016/j.trd.2020.102593. arXiv :2004.08286 [cs, eess, stat].
- Apronti, D., Ksaibati, K., Gerow, K. & Hepner, J. J. (2016). Estimating traffic volume on Wyoming low volume roads using linear and logistic regression methods. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 3(6), 493–506. doi : 10.1016/j.jtte.2016.02.004.
- Arrondissement de Saint-Laurent. (2023). *Plan d'urgence climatique 2021-2030*. Repéré le 2024-04-22 à <https://montreal.ca/articles/plan-d'urgence-climatique-2021-2030-de-saint-laurent-20949#:~:text=Avec%20son%20Plan%20d'urgence,se%20pr%C3%A9parer%20aux%20changements%20climatiques>.
- ARTM. (2024). *Enquête métropolitaine 2023 Perspectives mobilité. Faits saillants de l'état de la mobilité des personnes dans la région métropolitaine de Montréal*. Repéré le 2024-11-11 à https://www.artm.quebec/wp-content/uploads/2024/10/ARTM_Enquete2023_Faits_Saillants.pdf.
- ARTM. (s.d.). *Mobilité des personnes dans la région de Montréal. Enquête Origine-Destination 2013, version 13.2a*. Repéré à <https://www.artm.quebec/wp-content/uploads/2020/01/Mobilit%C3%A9%20des%20personnes%20dans%20la%20r%C3%A9gion%20de%20Montr%C3%A9al%C3%A9al%202013.pdf>.

Association canadienne des constructeurs de véhicules. (s.d.). Les émissions des véhicules. Repéré le 2025-04-08 à <https://www.cvma.ca/fr/dossiers-prioritaires/environnement/les-emissions-des-vehicules/>.

Barceló, J. (Éd.). (2010). *Fundamentals of Traffic Simulation*. New York, NY : Springer New York. doi : 10.1007/978-1-4419-6142-6.

Beaudette, C., Deschênes, M., Giroux-Denis, P., Lobos, M. & Tacquet, L. (2017). *Plan local de réduction des émissions de gaz à effet de serre 2016-2020*. Repéré le 2024-10-21 à https://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/ARROND_SLA_FR/MEDIA/DOCUMENTS/PLAN_LOCAL_GES_20170808.PDF.

Bonnemaizon, X., Ciais, P., Zhou, C., Arous, S. B., Davis, S. J. & Megel, N. (2024). Scaling traffic variables from sensors sample to the entire city at high spatiotemporal resolution with machine learning : applications to the Paris megacity. *Environmental Research : Infrastructure and Sustainability*, 4(3), 035010. doi : 10.1088/2634-4505/ad6bbf. Publisher : IOP Publishing.

Bourque, P.-A. & Université Laval. (2010). Le cycle du carbone. Dans *Planète Terre*. Département de Géologie et de Génie géologique de l'Université Laval. Repéré à <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/cycle.carbone.html>.

Boutin, S. & Tacquet, L. (2018). *Inventaires 2017 des émissions de gaz à effet de serre de l'arrondissement de Saint-Laurent*. Repéré le 2024-04-22 à https://www.enviroaccess.ca/expert-conseil/files/2013/09/Rapport-Inventaire-GES-2017_Final_.pdf.

BTER. (2024a). *Émissions de gaz à effet de serre de la collectivité montréalaise - Inventaire 2022 - Sommaire*. Repéré le 2024-06-08 à https://portail-m4s.s3.montreal.ca/pdf/vdm_inventaire_ges_collectivite_2022.pdf.

BTER. (2024b). *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.

BTER. (2025). *Émissions de gaz à effet de serre de la collectivité montréalaise – Inventaire 2023 Sommaire*. Montréal. Repéré à <https://mtl Ged.montreal.ca/constellio/?collection=mtlca&portal=REPDOCVDM#!displayDocument/00000114010>.

Bush, E. & Lemmen, D. S. (2019). *Rapport sur le climat changeant du Canada*. Ottawa, Ontario. Repéré le 2024-10-08 à https://natural-resources.canada.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/energy/Climate-change/pdf/RCCC_FULLREPORT-FR-FINAL.pdf.

- Castells, M. A. (2022). *Étude de la consommation de carburant et d'électricité du parc automobile québécois*. Montréal.
- CCNUCC. (2024). L'Accord de Paris. Repéré le 2024-10-08 à <https://unfccc.int/fr/a-propos-des-ndcs/l-accord-de-paris>.
- Chang, H.-h. & Cheon, S.-h. (2019). The potential use of big vehicle GPS data for estimations of annual average daily traffic for unmeasured road segments. *Transportation*, 46(3), 1011–1032. doi : 10.1007/s11116-018-9903-6.
- Ciais, P., Dolman, A. J., Bombelli, A., Duren, R., Peregon, A., Rayner, P. J., Miller, C., Gobron, N., Kinderman, G., Marland, G., Gruber, N., Chevallier, F., Andres, R. J., Balsamo, G., Bopp, L., Bréon, F.-M., Broquet, G., Dargaville, R., Battin, T. J., Borges, A., Bovensmann, H., Buchwitz, M., Butler, J., Canadell, J. G., Cook, R. B., DeFries, R., Engelen, R., Gurney, K. R., Heinze, C., Heimann, M., Held, A., Henry, M., Law, B., Luyssaert, S., Miller, J., Moriyama, T., Moulin, C., Myneni, R. B., Nussli, C., Obersteiner, M., Ojima, D., Pan, Y., Paris, J.-D., Piao, S. L., Poulter, B., Plummer, S., Quegan, S., Raymond, P., Reichstein, M., Rivier, L., Sabine, C., Schimel, D., Tarasova, O., Valentini, R., Wang, R., van der Werf, G., Wickland, D., Williams, M. & Zehner, C. (2014). Current systematic carbon-cycle observations and the need for implementing a policy-relevant carbon observing system. *Biogeosciences*, 11(13), 3547–3602. doi : 10.5194/bg-11-3547-2014. Publisher : Copernicus GmbH.
- Ciais, P., Zhou, C., De Castelbajac, M., Zhu, B., Huo, D. & Ben Arous, S. (2023). High Resolution Emission Inventories in Near Real Time for Cities [City Workshop]. Repéré le 2024-09-11 à https://coco2-project.eu/sites/default/files/2024-05/Presentation_Ciais_ICLEI_May-2023-komprimiert2.pdf.
- Copernicus. (2025). Copernicus : 2024 is the first year to exceed 1.5°C above pre-industrial level | Copernicus. Repéré le 2025-01-16 à <https://climate.copernicus.eu/copernicus-2024-first-year-exceed-15degc-above-pre-industrial-level>.
- Cucchi, K., Lian, J., Rossi, A., Millair, L., Utard, H., Adamo, M. & Duccini, D. (2023). Measuring Atmospheric CO₂ for Accelerating the Low-Carbon Transition in Cities : Origins.earth, from Paris to Italy. *Environmental Sciences Proceedings*, 21(1), 88. doi : 10.3390/environsciproc2022021088. Number : 1 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Das, S. & Tsapakis, I. (2020). Interpretable machine learning approach in estimating traffic volume on low-volume roadways. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 9(1), 76–88. doi : 10.1016/j.ijtst.2019.09.004.

Deuskar, C. & Zhou, C. (2024). Carbon Monitor Cities 2.0 : tracking sectoral urban emissions in near real time. Montréal.

Division de la planification et du suivi environnemental Service de l'environnement. (2016). Inventaire des émissions de gaz à effet de serre 2013. Collectivité montréalaise. Repéré le 2024-10-24 à https://ville.montreal.qc.ca/documents/Adi_Public/CE/CE_DA_ORDI_2016-12-07_08h30_Inventaire_-_GES.pdf.

Dou, X., Wang, Y., Ciais, P., Chevallier, F., Davis, S. J., Crippa, M., Janssens-Maenhout, G., Guizzardi, D., Solazzo, E., Yan, F., Huo, D., Zheng, B., Zhu, B., Cui, D., Ke, P., Sun, T., Wang, H., Zhang, Q., Gentine, P., Deng, Z. & Liu, Z. (2022). Near-real-time global gridded daily CO₂ emissions. *The Innovation*, 3(1), 100182. doi : 10.1016/j.xinn.2021.100182.

ECCC. (2022). *Plan de réduction des émissions pour 2030*. Repéré le 2024-10-15 à <https://publications.gc.ca/site/fra/9.909339/publication.html>.

ECCC. (2023). Les données recueillies sous le Règlement sur les carburants renouvelables. Repéré le 2025-04-11 à <https://data-donnees.az.ec.gc.ca/data/regulatee/submissions/data-collected-under-the-renewable-fuels-regulations///?lang=fr>.

ECCC. (2024a). *Rapport d'inventaire national 1990-2022 : sources et puits de gaz à effet de serre au Canada. Partie 1*. Repéré le 2024-07-13 à https://publications.gc.ca/collections/collection_2024/eccc/En81-4-2022-1-fra.pdf.

ECCC. (2024b). *Rapport d'inventaire national 1990-2022 : sources et puits de gaz à effet de serre au Canada. Partie 2*. Repéré le 2024-07-13 à https://publications.gc.ca/collections/collection_2024/eccc/En81-4-2022-2-fra.pdf.

Eckert, J. & Al-Habashna, A. (2022). *Estimation du débit de circulation à partir des images de caméras de circulation : vers des flux de données sur la circulation en temps réel* (Rapport n°18-001-X). Repéré le 2023-10-18 à <https://www150.statcan.gc.ca/n1/fr/pub/18-001-x/18-001-x2022001-fra.pdf?st=aRsAS-JW>.

FHWA. (2018). *Traffic Data Computation Method POCKET GUIDE* (Rapport n°FHWA-PL-18-027). Repéré à https://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/pubs/pl18027_traffic_data_pocket_guide.pdf.

FHWA. (2022). *2022 Traffic Monitoring Guide*. Repéré le 2024-09-23 à https://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/tmguide/2022_TMG_Final_Report.pdf.

Fong, W. K. & Doust, M. (2014). *Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories - Executive Summary*. Repéré le 2024-06-08 à <https://www.wri.org/research/global-protocol-community-scale-greenhouse-gas-emission-inventories>.

- 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.*
- Fontes, T., Pereira, S. R., Fernandes, P., Bandeira, J. M. & Coelho, M. C. (2015). How to combine different microsimulation tools to assess the environmental impacts of road traffic ? Lessons and directions. *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, 34, 293–306. doi : 10.1016/j.trd.2014.11.012.
- Ganji, A., Shekarrizfard, M., Harpalani, A., Coleman, J. & Hatzopoulou, M. (2020). Methodology for spatio-temporal predictions of traffic counts across an urban road network and generation of an on-road greenhouse gas emission inventory. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 35(10), 1063–1084. doi : 10.1111/mice.12508. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/mice.12508>.
- Ganji, A., Zhang, M. & Hatzopoulou, M. (2022). Traffic volume prediction using aerial imagery and sparse data from road counts. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 141, 103739. doi : 10.1016/j.trc.2022.103739.
- Garber, N. J. & Hoel, L. A. (2015). *Traffic and highway engineering* (éd. Fifth edition, SI edition). Stamford, CT, USA : Cengage Learning.
- Gately, C. K. & Hutyra, L. R. (2017). Large Uncertainties in Urban-Scale Carbon Emissions. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 122(20), 11,242–11,260. doi : 10.1002/2017JD027359. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/2017JD027359>.
- Gately, C. K., Hutyra, L. R. & Sue Wing, I. (2015). Cities, traffic, and CO₂ : A multidecadal assessment of trends, drivers, and scaling relationships. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(16), 4999–5004. doi : 10.1073/pnas.1421723112. Publisher : Proceedings of the National Academy of Sciences.
- GIEC. (2006a). Chapitre 3 : Incertitudes. Dans *Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre* (vol. Volume 1 : Orientations générales et établissement des rapports). Repéré à <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/french/vol1.html>.
- GIEC. (2006b). *Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre, préparé par le Programme pour les inventaires nationaux des gaz à effet de serre*. IGES, Japon : Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. et Tanabe K. Repéré à <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/french/index.html>.

Google. (2024). Méthodologie. Repéré le 2024-01-31 à <https://insights.sustainability.google/methodology?hl=fr#transportation>.

Gouvernement du Canada. (2025). Règlement sur les émissions des véhicules routiers et de leurs moteurs. Repéré le 2025-04-08 à <https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/reglements/DORS-2003-2/page-2.html#h-689962>.

Gouvernement du Québec. (2022). *Plan pour une économie verte. Stratégie de mobilisation pour l'action climatique 2022-2027.* Repéré à <https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/environnement/publications-adm/strategie-mobilisation-action-climatique/strategie-mobilisation-action-climatique.pdf>.

Greenhouse Gas Protocol. (2024). IPCC Global Warming Potential Values. Repéré le 2025-01-16 à <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2024-08/Global-Warming-Potential-Values%20%28August%202024%29.pdf>.

Grujić, N., Brdar, S., Osinga, S., Hofstede, G. J., Athanasiadis, I. N., Pljakić, M., Obrenović, N., Govđarica, M. & Crnojević, V. (2022). Combining Telecom Data with Heterogeneous Data Sources for Traffic and Emission Assessments—An Agent-Based Approach. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(7), 366. doi : 10.3390/ijgi11070366. Number : 7 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

Gurney, K. R., Mendoza, D., Geethakumar, S., Zhou, Y., Chandrasekaran, V., Miller, C., Godbole, A., Sahni, N., Seib, B., Ansley, W., Peraino, S., Chen, X., Maloo, U., Kam, J. & Binion, J. (2009a). Vulcan Science Methods Documentation, Version 2.0. Repéré le 2024-01-12 à <https://vulcan.rc.nau.edu/assets/files/Vulcan.documentation.v2.0.online.pdf>.

Gurney, K. R., Mendoza, D. L., Zhou, Y., Fischer, M. L., Miller, C. C., Geethakumar, S. & de la Rue du Can, S. (2009b). High Resolution Fossil Fuel Combustion CO₂ Emission Fluxes for the United States. *Environmental Science & Technology*, 43(14), 5535–5541. doi : 10.1021/es900806c. Publisher : American Chemical Society.

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.

Gurney, K. R., Liang, J., O'Keeffe, D., Patarasuk, R., Hutchins, M., Huang, J., Rao, P. & Song, Y. (2019a). Comparison of Global Downscaled Versus Bottom-Up Fossil Fuel CO₂ Emissions at the Urban Scale in Four U.S. Urban Areas. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 124(5), 2823–2840. doi : 10.1029/2018JD028859. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2018JD028859>.

- Gurney, K. R., Patarasuk, R., Liang, J., Song, Y., O'Keeffe, D., Rao, P., Whetstone, J. R., Duren, R. M., Eldering, A. & Miller, C. (2019b). The Hestia fossil fuel CO₂ emissions data product for the Los Angeles megacity (Hestia-LA). *Earth System Science Data*, 11(3), 1309–1335. doi : 10.5194/essd-11-1309-2019.
- Gurney, K. R., Romero-Lankao, P., Seto, K. C., Hutyra, L. R., Duren, R., Kennedy, C., Grimm, N. B., Ehleringer, J. R., Marcotullio, P., Hughes, S., Pincetl, S., Chester, M. V., Runfola, D. M., Feddema, J. J. & Sperling, J. (2015). Climate change : Track urban emissions on a human scale. *Nature*, 525(7568), 179–181. doi : 10.1038/525179a. Publisher : Nature Publishing Group.
- Highway Agency. (1996). Traffic appraisal of road schemes, Section 2.5, Part I, Traffic appraisal in urban areas. Dans *Design manual for roads and bridges* (vol. 12). The Stationery Office, London.
- Huo, D., Huang, X., Dou, X., Ciais, P., Li, Y., Deng, Z., Wang, Y., Cui, D., Benkhelifa, F., Sun, T., Zhu, B., Roest, G., Gurney, K. R., Ke, P., Guo, R., Lu, C., Lin, X., Lovell, A., Appleby, K., DeCola, P. L., Davis, S. J. & Liu, Z. (2022). Carbon Monitor Cities near-real-time daily estimates of CO₂ emissions from 1500 cities worldwide. *Scientific Data*, 9(1), 533. doi : 10.1038/s41597-022-01657-z. Publisher : Nature Publishing Group.
- Institut de la statistique du Québec. (2024). Dépenses de consommation finale des ménages détaillées, Québec, 2010-2024. Repéré le 2024-12-10 à <https://statistique.quebec.ca/fr/produit/tableau/depenses-consommation-finale-menages-detaillees-quebec>.
- IPCC. (2023a). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis : Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge : Cambridge University Press. doi : 10.1017/9781009157896.
- IPCC. (2023b). *Climate Change 2023 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]*. Geneva, Switzerland. Repéré le 2024-10-02 à <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>.
- Koupal, J., Cumberworth, M., Michaels, H., Beardsley, M. & Brzezinski, D. (2022). *Draft Design and Implementation Plan for EPA's Multi-Scale Motor Vehicle and Equipment Emission System (MOVES)* (Rapport n°EPA420-P-02-006). Repéré le 2024-12-10 à <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1000527.PDF?Dockey=P1000527.PDF>.
- Labidi, A. (2020). *Vers une modélisation améliorée du secteur du transport dans l'inventaire d'émissions de gaz à effet de serre dans la ville de Montréal*. (Mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure, Montréal). Repéré à https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/2616/1/LABIDI_Ahmed.pdf.

- Lapuerta, M., Rodríguez-Fernández, J. & Herreros, J. M. (2017). Gaseous and Particle Greenhouse Emissions from Road Transport. Dans Harrison, R. M. & Hester, R. E. (Éds.), *Issues in Environmental Science and Technology* (pp. 25–45). Cambridge : Royal Society of Chemistry. doi : 10.1039/9781788010221-00025.
- Lewis, C. D. (1982). *Industrial and business forecasting methods : a practical guide to exponential smoothing and curve fitting*. London : Butterworth Scientific.
- Li, Y., Lv, C., Yang, N., Liu, H. & Liu, Z. (2020). A study of high temporal-spatial resolution greenhouse gas emissions inventory for on-road vehicles based on traffic speed-flow model : A case of Beijing. *Journal of Cleaner Production*, 277, 122419. doi : <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122419>.
- Lian, J., Bréon, F.-M., Broquet, G., Lauvaux, T., Zheng, B., Ramonet, M., Xueref-Remy, I., Kotthaus, S., Haeffelin, M. & Ciais, P. (2021). Sensitivity to the sources of uncertainties in the modeling of atmospheric CO₂ concentration within and in the vicinity of Paris. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(13), 10707–10726. doi : 10.5194/acp-21-10707-2021. Publisher : Copernicus GmbH.
- Lian, J., Lauvaux, T., Utard, H., Bréon, F.-M., Broquet, G., Ramonet, M., Laurent, O., Albarus, I., Cucchi, K. & Ciais, P. (2022). Supporting Information “Assessing the effectiveness of an urban CO₂ monitoring network over the Paris region through the COVID-19 lockdown natural experiment”. *Environmental Science & Technology*, 56(4), 2153–2162. Repéré à https://pubs.acs.org/doi/suppl/10.1021/acs.est.1c04973/suppl_file/es1c04973_si_001.pdf.
- Lian, J., Lauvaux, T., Utard, H., Bréon, F.-M., Broquet, G., Ramonet, M., Laurent, O., Albarus, I., Chariot, M., Kotthaus, S., Haeffelin, M., Sanchez, O., Perrussel, O., Denier Van Der Gon, H. A., Dellaert, S. N. C. & Ciais, P. (2023). Supplement of Can we use atmospheric CO₂ measurements to verify emission trends reported by cities ? Lessons from a 6-year atmospheric inversion over Paris. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(15), 8823–8835. doi : 10.5194/acp-23-8823-2023.
- Liu, Z., Ciais, P., Deng, Z., Davis, S. J., Zheng, B., Wang, Y., Cui, D., Zhu, B., Dou, X., Ke, P., Sun, T., Guo, R., Zhong, H., Boucher, O., Bréon, F.-M., Lu, C., Guo, R., Xue, J., Boucher, E., Tanaka, K. & Chevallier, F. (2020a). Carbon Monitor, a near-real-time daily dataset of global CO₂ emission from fossil fuel and cement production. *Scientific Data*, 7(1), 392. doi : 10.1038/s41597-020-00708-7. Publisher : Nature Publishing Group.

- Liu, Z., Ciais, P., Deng, Z., Lei, R., Davis, S. J., Feng, S., Zheng, B., Cui, D., Dou, X., Zhu, B., Guo, R., Ke, P., Sun, T., Lu, C., He, P., Wang, Y., Yue, X., Wang, Y., Lei, Y., Zhou, H., Cai, Z., Wu, Y., Guo, R., Han, T., Xue, J., Boucher, O., Boucher, E., Chevallier, F., Tanaka, K., Wei, Y., Zhong, H., Kang, C., Zhang, N., Chen, B., Xi, F., Liu, M., Bréon, F.-M., Lu, Y., Zhang, Q., Guan, D., Gong, P., Kammen, D. M., He, K. & Schellnhuber, H. J. (2020b). Near-real-time monitoring of global CO₂ emissions reveals the effects of the COVID-19 pandemic. *Nature Communications*, 11(1), 5172. doi : 10.1038/s41467-020-18922-7.
- Ma, J., Xu, M. & Jiang, J. (2023). Mapping high-resolution urban road carbon and pollutant emissions using travel demand data. *Energy*, 263, 126059. doi : 10.1016/j.energy.2022.126059.
- Mateo Pla, M. A., Lorenzo-Sáez, E., Luzuriaga, J. E., Mira Prats, S., Moreno-Pérez, J. A., Urchueguía, J. F., Oliver-Villanueva, J.-V. & Lemus, L. G. (2021). From traffic data to GHG emissions : A novel bottom-up methodology and its application to Valencia city. *Sustainable Cities and Society*, 66, 102643. doi : 10.1016/j.scs.2020.102643.
- Mathew, S. & Pulugurtha, S. (2021). Comparative Assessment of Geospatial and Statistical Methods to Estimate Local Road Annual Average Daily Traffic. *Journal of Transportation Engineering, Part A : Systems*, 147(7), 04021035 (19 pp.). doi : 10.1061/JTEPBS.0000542. Place : USA Publisher : American Society of Civil Engineers.
- McCord, M. R., Yang, Y., Jiang, Z., Coifman, B. & Goel, P. K. (2003). Estimating Annual Average Daily Traffic from Satellite Imagery and Air Photos : Empirical Results. *Transportation Research Record*, 1855(1), 136–142. doi : 10.3141/1855-17. Publisher : SAGE Publications Inc.
- McCord, M. R., Goel, P., NEXTRANS Center (U.S.) & Ohio State University. (2009). *Estimating AADT from combined air photos and ground based data : system design, prototyping, and testing*. (Rapport n°002OY01). Repéré le 2024-09-25 à <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/5707>.
- MELCCFP. (2024a). *GES 1990-2022, Supplément à l'inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2022 et leur évolution depuis 1990 - Méthodologies de calcul d'émissions, description des secteurs et facteurs d'émission*. Repéré à <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/2022/inventaire-1990-2022-supplement-calculs.pdf>.
- MELCCFP. (2024b). *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2022 et leur évolution depuis 1990*. Repéré à <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/2022/inventaire-ges-1990-2022.pdf>.

MELCCFP. (2024c). Engagements du Québec. Nos cibles de réduction d'émissions de GES. Repéré le 2024-10-17 à <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changementsclimatiques/engagement-quebec.asp>.

MELCCFP. (2024d). Transport routier. Repéré le 2024-12-10 à <https://www.environnement.gouv.qc.ca/air/transport-routier/index.htm>.

MELCCFP. (2025). *Guide de quantification des émissions de gaz à effet de serre*. Québec. Repéré à <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/guide-quantification/guide-quantification-ges.pdf>.

Ministère des Transports. (2019). Documentation sur le modèle de transport de la région de Montréal. MOTREM13. Document inédit, ministère des Transports, Direction de la modélisation des systèmes de transport.

Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports. (2017). Bulletin d'information. Rappel et précisions concernant la définition d'un véhicule lourd prévue dans la loi concernant les propriétaires, les exploitants et les conducteurs de véhicules lourds. Repéré le 2024-07-22 à <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/entreprises-partenaires/ent-camionnage/Documents/info-camionnage/info-cam-2017-02-20.pdf>.

Ministère des Transports et de la Mobilité durable. (2023). *Guide 2023 de l'analyse avantages-coûts des projets publics en transport routier - Partie I - Méthodologie*. Repéré le 2024-07-19 à <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/entreprises-partenaires/entreprises-reseaux-routier/guides-formulaires/documents-gestionprojetsroutiers/guideaac-methodologie.pdf>.

Ministère des Transports et de la Mobilité durable. (2024a). Débit de circulation [Jeu de données]. Données Québec, 2017. Repéré le 2024-03-14 à <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/debit-de-circulation>.

Ministère des Transports et de la Mobilité durable. (2024b). Débit de circulation - Dictionnaire des données. Repéré le 2024-12-05 à <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/debit-de-circulation/resource/782087a6-3f53-4591-b9e2-07af432a1379>.

Ministère des Transports et de la Mobilité durable. (2025). Réseau de camionnage [Jeu de données]. Données Québec, 2012. Repéré le 2025-06-06 à <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/reseau-camionnage>.

Miovision. (2024). Guide de classification des données de circulation Miovision. Repéré le 2024-12-05 à <https://help.miovision.com/s/article/North-American-Classification-Guide?language=fr>.

- Nalini, K., Lauvaux, T., Abdallah, C., Lian, J., Ciais, P., Utard, H., Laurent, O. & Ramonet, M. (2022). High-Resolution Lagrangian Inverse Modeling of CO₂ Emissions Over the Paris Region During the First 2020 Lockdown Period. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 127(14), e2021JD036032. doi : 10.1029/2021JD036032. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2021JD036032>.
- Nations Unies. (1992). Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques. Repéré le 2024-10-07 à <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convfr.pdf>.
- Nations Unies. (2015). Accord de Paris. Repéré le 2024-10-11 à https://unfccc.int/sites/default/files/french_paris_agreement.pdf.
- Organisation météorologique mondiale. (2024). Climate. Repéré le 2024-10-08 à <https://wmo.int/topics/climate>.
- Patarasuk, R., Gurney, K. R., O'Keeffe, D., Song, Y., Huang, J., Rao, P., Buchert, M., Lin, J. C., Mendoza, D. & Ehleringer, J. R. (2016). Urban high-resolution fossil fuel CO₂ emissions quantification and exploration of emission drivers for potential policy applications. *Urban Ecosystems*, 19(3), 1013–1039. doi : 10.1007/s11252-016-0553-1.
- Phan, T. M. & St-Pierre, B. (2020). Modélisation de la demande de transport et des émissions résultantes.
- Plötz, P., Moll, C., Bieker, G., Mock, P. & Li, Y. (2020). *Real-world usage of plug-in hybrid electric vehicles : Fuel consumption, electric driving, and CO₂ emissions*. Repéré le 2024-07-20 à <https://theicct.org/publication/real-world-usage-of-plug-in-hybrid-electric-vehicles-fuel-consumption-electric-driving-and-co2-emissions/>.
- Regehr, J. D., Montufar, J. & Hernandez-Vega, H. (2015). Traffic Pattern Groups Based on Hourly Traffic Variations in Urban Areas. *Journal of Transportation of the Institute of Transportation Engineers*, 7, 1–16. Repéré à https://www.researchgate.net/publication/295595175_Traffic_Pattern_Groups_Based_on_Hourly_Traffic_Variations_in_Urban_Areas?enrichId=rgreq-4995132f9dd63de0caf2da2d778411ce-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI5NTU5NTE3NTtBUzo0Njk2NjU3ODE2ODYyNzNAMTQ4ODk4ODQ1Njg3D%3D&el=1_x_2.
- Reksten, J. H. & Salberg, A.-B. (2021). Estimating Traffic in Urban Areas from Very-High Resolution Aerial Images. *International Journal of Remote Sensing*, 42(3), 865–883. doi : 10.1080/01431161.2020.1815891. Publisher : Taylor & Francis _eprint : <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1815891>.
- RNCAN. (2011). *Enquête 2009 sur les véhicules au Canada - Rapport Sommaire*. Repéré le 2024-07-08 à <https://oee.nrcan.gc.ca/publications/statistiques/evc/2009/pdf/evc09.pdf>.

RNCAN. (2018). Essais sur la consommation de carburant. Repéré le 2024-02-28 à <https://ressources-naturelles.canada.ca/efficacite-energetique/efficacite-energetique-transports-carburants-replacement/guide-consommation-carburant/essais-consommation-carburant/essais-consommation-carburant/21009>.

RNCAN. (2024a). Cotes de consommation de carburant. Repéré le 2024-02-29 à <https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/98f1a129-f628-4ce4-b24d-6f16bf24dd64>.

RNCAN. (2024b). Explication des tableaux. Repéré le 2024-07-22 à <https://ressources-naturelles.canada.ca/efficacite-energetique/efficacite-energetique-transports-carburants-replacement/vehicules-personnels/choisir-bon-vehicule/achat-d-un-vehicule-electrique/explication-des-tableaux/21384>.

RNCAN. (2024c). Secteur des transports Québec Tableau 37 : Variables explicatives des camions. Repéré le 2024-07-18 à <https://oee.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/showTable.cfm?type=CP§or=tran&juris=qc&year=2021&rn=37&page=0>.

Rollin, E. (2023). *Analyse des émissions de GES des transports de la Ville de Montréal à partir des données d'activité en mobilité de Google*. (Mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure, Montréal).

ROSE & AIRPARIF. (2022). Consommations énergétiques et émissions de gaz à effet de serre de la base ENERGIF : sources et méthodologie de calculs. Repéré le 2023-05-25 à https://geoweb.iau-idf.fr/ressources/cartoviz/energif/2022/doc/20220901_AIRPARIF_Methode_ENERGIF.pdf.

Régie de l'énergie du Canada. (2024). Profils énergétiques des provinces et territoires – Québec. Repéré le 2025-05-22 à <https://www.cer-rec.gc.ca/fr/donnees-analyse/marches-energetiques/profils-energetiques-provinces-territoires/profils-energetiques-provinces-territoires-quebec.html>.

SAAQ. (2020). Véhicules en circulation, 2017 [Jeu de données]. Données Québec, 2017. Repéré à <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/vehicules-en-circulation/resource/e2a6249f-849b-41ca-b224-6648f364ebb8>.

SAAQ. (2023a). Documentation sur les variables. Repéré le 2024-02-28 à <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/vehicules-en-circulation>.

SAAQ. (2023b). Véhicules en circulation [Jeu de données]. Données Québec, 2017. Repéré le 2023-11-14 à <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/vehicules-en-circulation>.

- Sathya, S. (2024). NAVIGATING THE TELEMATICS LANDSCAPE : APPLICATIONS, TECHNOLOGY, CHALLENGES AND IMPACT. Dans *Futuristic Trends in Network & Communication Technologies* (éd. First, vol. 3, pp. 100–112). Iterative International Publishers, Selfypage Developers Pvt Ltd. doi : 10.58532/V3BINC3P3CH8.
- Saxena, N., Irandoust, E. & Soet, W. (2021). An overview of dynamic traffic assignment models for practitioners. Repéré à https://australasiantransportresearchforum.org.au/wp-content/uploads/2022/05/ATRF2021_Resubmission_94-1.pdf.
- Schipper, L., Herbert, F. & Leather, J. (2009). *Transport and Carbon Dioxide Emissions : Forecasts, Options Analysis, and Evaluation*. Repéré le 2024-10-31 à <https://www.adb.org/publications/transport-and-carbon-dioxide-emissions-forecasts-options-analysis-and-evaluation>.
- Selby, B. & Kockelman, K. M. (2013). Spatial prediction of traffic levels in unmeasured locations : applications of universal kriging and geographically weighted regression. *Journal of Transport Geography*, 29, 24–32. doi : 10.1016/j.jtrangeo.2012.12.009.
- Sharma, S., Lingras, P., Xu, F. & Kilburn, P. (2001). Application of neural networks to estimate AADT on low-volume roads. *Journal of Transportation Engineering*, 127(5), 426–432. doi : 10.1061/(ASCE)0733-947X(2001)127:5(426).
- Sharma, S. C., Gulati, B. M. & Rizak, S. N. (1996). Statewide Traffic Volume Studies and Precision of AADT Estimates. *Journal of Transportation Engineering*, 122(6), 430–439. doi : 10.1061/(ASCE)0733-947X(1996)122:6(430). Publisher : American Society of Civil Engineers.
- Sitati, C. N., Oludhe, C., Oyake, L. & Mbandi, A. M. (2022). A street-level assessment of greenhouse gas emissions associated with traffic congestion in the city of Nairobi, Kenya. *Clean Air Journal*, 32(1), 12. doi : 10.17159/caj/2022/32/1.12546. Number : 1.
- St-Pierre, B. (2019). Émissions polluantes et consommation de carburant. Modélisation spécifique au domaine des transports. Repéré à https://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2018/12/MTQ_PPTModel_30janv19.pdf.
- Statistique Canada. (2024). Tableau de bord du flux de trafic. Repéré le 2024-12-05 à <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/71-607-x/71-607-x2022018-fra.htm>.
- STM. (2014). *Rapport de développement durable 2013*. Repéré à <https://www.stm.info/sites/default/files/pdf/fr/rdd2013.pdf>.
- Streetlight. (2023a). *All Vehicles Volume Methodology and Validation Canada*. Repéré à <https://www.streetlightdata.com/whitepapers/>.

Streetlight. (2023b). *StreetLight AADT 2019 and 2020 Methodology and Validation White Paper Canada*. Repéré à <https://www.streetlightdata.com/whitepapers/>.

Streetlight. (2024). *All Vehicles Aggregated GPS Volume Methodology and Validation Canada*. Repéré à <https://www.streetlightdata.com/whitepapers/>.

Stéphan, N. (2022). *Estimation des émissions de CO₂ à haute résolution spatiale et temporelle pour le transport routier de l'arrondissement montréalais de Saint-Laurent*. (Mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure, Montréal). Repéré à <https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/3223>.

Sun, X. & Das, S. (2015). *Developing a method for estimating AADT on all Louisiana roads*. (Rapport n°FHWA/LA.14/548). Baton Rouge, Louisiana. Repéré le 2024-12-02 à <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/29681>.

The World Bank. (2016). The CURB Tool : Climate Action for Urban Sustainability. Repéré le 2024-04-11 à <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/brief/the-curb-tool-climate-action-for-urban-sustainability>.

TomTom. (2025a). About | TomTom Traffic Index. Repéré le 2025-02-06 à <https://www.tomtom.com/traffic-index/about/>.

TomTom. (2025b). Traffic Data : The Key to Effective Road Traffic Management. Repéré le 2025-02-06 à <https://www.tomtom.com/newsroom/behind-the-map/road-traffic-management/>.

Transports Canada. (2009). *Rapport technique - Technologie hybride*. Repéré à <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1018809.pdf>.

U.S. EPA. (2019). What is Vehicle Specific Power (VSP) ? Repéré le 2024-12-10 à <https://www.epa.gov/moves/what-vehicle-specific-power-vsp>.

U.S. EPA. (2024). *Overview of EPA's MOtor Vehicle Emission Simulator (MOVES5)* (Rapport n°EPA-420-R-24-011).

Ville de Montréal. (2017a). Déplacements MTL Trajet. Repéré le 2024-12-05 à <https://donnees.montreal.ca/dataset/mlt-trajet>.

Ville de Montréal. (2017b). Déplacements MTL Trajet [Jeu de données]. Données ouvertes. Repéré le 2024-12-05 à <https://donnees.montreal.ca/dataset/mlt-trajet>.

Ville de Montréal. (2020). *Plan climat 2020-2030*. Repéré à https://portail-m4s.s3.montreal.ca/pdf/Plan_climat%202020-16-16-VF4_VDM.pdf.

- Ville de Montréal. (2025a). Comptages des véhicules, cyclistes et piétons aux intersections munies de feux de circulation [Jeu de données]. Données ouvertes. Repéré le 2023-12-05 à <https://donnees.montreal.ca/dataset/comptage-vehicules-pietons>.
- Ville de Montréal. (2025b). Collisions routières [Jeu de données]. Données ouvertes. Repéré le 2025-06-06 à <https://donnees.montreal.ca/dataset/collisions-routieres>.
- Ville de Montréal. (2025c). Entraves et travaux en cours (anciennement Info-travaux) [Jeu de données]. Données ouvertes. Repéré le 2025-06-06 à <https://donnees.montreal.ca/dataset/info-travaux>.
- Ville de Montréal. (s.d.). Géobase - réseau routier. Repéré le 2025-04-02 à <https://donnees.montreal.ca/dataset/geobase#keywords>.
- Wardrop, J. G. (1952). Some Therorical Aspects of Road Traffic Research. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part II*, 1(3), 325–378. doi : 10.1680/ipeds.1952.11259.
- Wen, Y., Wu, R., Zhou, Z., Zhang, S., Yang, S., Wallington, T. J., Shen, W., Tan, Q., Deng, Y. & Wu, Y. (2022). A data-driven method of traffic emissions mapping with land use random forest models. *Applied Energy*, 305, 117916. doi : <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117916>.
- World Bank Group. (2017). *CURB tool : climate action for urban sustainability (Vol. 2) : User guide*. Washington, D.C. Repéré le 2024-01-31 à <http://documents.worldbank.org/curated/en/499791474471650053/User-guide>.
- Wyatt, D. W. (2017). *Assessing Micro-Scale Carbon Dioxide (CO₂) Emission on UK Road Networks using a Coupled Traffic Simulation and Vehicle Emission Model*. (Thèse de doctorat, University of Leeds). Repéré à https://etheses.whiterose.ac.uk/19238/1/Wyatt_DW_Engineering_PhD_2017.pdf.
- Zhang, X. & Chen, M. (2020). Enhancing Statewide Annual Average Daily Traffic Estimation with Ubiquitous Probe Vehicle Data. *Transportation Research Record*, 2674(9), 649–660. doi : 10.1177/0361198120931100. Publisher : SAGE Publications Inc.