

Estimation des émissions de CO₂ à haute résolution spatiale et
temporelle pour le transport routier de l'arrondissement
montréalais de Saint-Laurent

par

Nolwen STÉPHAN

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

M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 31 MARS 2023

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Nolwen Stéphan, 2023



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 œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

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

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

M. Diego Ramirez-Cardona, président du jury
Département du génie de la construction à l'École de technologie supérieure

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

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

LE 9 MARS 2023

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de ma maîtrise et qui m'ont aidée lors de la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, je tiens à remercier chaleureusement Mme Annie Levasseur, professeure à l'École de technologie supérieure (ETS). En tant que directrice de mémoire, elle m'a fournie tout le support nécessaire, et beaucoup plus tout au long de mon parcours à l'ÉTS. J'aimerais aussi gratifier Mme Catherine Morency, professeure à Polytechnique Montréal et codirectrice de mémoire pour sa disponibilité et ses judicieux conseils. En outre, je remercie les professeurs de l'ETS qui m'ont fournie les outils nécessaires à la réussite de mes études universitaires. Finalement, je désire aussi adresser un profond remerciement à M. Gang Cao, Ingénieur à la section planification, Division planification et développement de la mobilité de la Ville de Montréal, pour sa précieuse collaboration, sa patience, et son soutien technique.

Je dédie principalement ce travail à :

- Mes parents et mes frères pour leurs supports inconditionnels et continus dans toutes les étapes de mon parcours académique.
- Mon conjoint pour son amour, son soutien et son avis critique qui m'ont été précieux.
- Mes amis, mes colocataires et mes proches qui ont contribué de façon directe ou indirecte au bon déroulement de mon mémoire.
- Mon chat, fidèle compagnon qui m'aura soutenu émotionnellement jusqu'à son dernier jour.

Estimation des émissions de CO₂ à haute résolution spatiale et temporelle pour le transport routier de l'arrondissement montréalais de Saint-Laurent

Nolwen STÉPHAN

RÉSUMÉ

La ville de Montréal s'est engagée à réduire ses émissions de GES de moitié sous le niveau de 1990 pour 2030 et vise la carboneutralité à l'horizon 2050. Pour s'y tenir, elle a besoin d'inventaires d'émissions de GES à haute résolution spatiale et temporelle afin de légiférer de manière éclairée et efficace. C'est dans ce cadre qu'intervient 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 à l'École de technologie supérieure. L'objectif de ce projet est de créer un jumeau numérique de la ville de Montréal où se superposeront des couches représentant les différentes émissions de GES à différents moments.

Le but de cette étude est de fournir des recommandations pour les estimations d'émissions de CO₂ de la carte carbone pour le secteur du transport routier dans l'arrondissement de Saint-Laurent. Les objectifs sont d'utiliser la modélisation de la circulation dans le logiciel AIMSUN faite à partir de l'enquête origine/destination et de la coupler à des modèles d'estimations d'émissions : les trois modèles environnementaux d'AIMSUN (LEM : *London Emissions Model*, Panis et al., 2006, et le modèle de consommation de carburant) et MOVES. Ces quatre méthodes d'estimation d'émissions sont comparées et des analyses de sensibilité sont conduites. Afin d'utiliser la modélisation de la circulation avec tous les modèles environnementaux d'AIMSUN, celle-ci a dû être modifiée en passant de l'échelle mésoscopique à microscopique et de la méthode d'affectation des chemins *Dynamic User Equilibrium* (DUE) à *Stochastic Route Choice* (SRC).

Les résultats montrent que c'est le changement d'échelle qui a le plus d'impact sur les résultats d'inventaires. Au global, la différence est de + 6 % d'estimation d'émissions pour le microscopique SRC par rapport au mésoscopique DUE. Pour les méthodes d'estimation d'émissions, c'est MOVES qui estime le plus d'émissions de CO₂ (+ 2 % par rapport aux modèles microscopique d'AIMSUN, Panis et le modèle de consommation de carburant, et + 16 % par rapport à LEM), mais le modèle de MOVES tient aussi compte de plus de phénomènes d'émissions qui représentent plus de 10 % de l'inventaire final de MOVES (préchauffage moteur, accessoires...).

Après comparaison des avantages et inconvénients des quatre méthodes, ce sont soit le modèle de consommation de carburant d'AIMSUN, soit MOVES qui seraient recommandés pour la carte carbone. De futures recherches seront alors nécessaires afin d'étudier l'impact de la calibration du modèle de trafic, l'adaptation à Montréal du paramétrage, et l'automatisation du calcul des émissions.

Mots-clés: gaz à effet de serre, transport routier, Ville de Montréal, modélisation de la circulation, inventaire d'émissions

Estimation of CO₂ emissions at high spatial and temporal resolution for road transportation in the Montreal borough of Saint-Laurent

Nolwen STÉPHAN

ABSTRACT

The City of Montreal sets goals concerning its GHG emissions to decrease them by half, below the 1990 threshold, by 2030 and is aiming for carbon neutrality by 2050. To attain this objective, the city needs GHG emission inventories with a high spatial and temporal resolution to make informed and effective decisions. It is in this context that the carbon map project of the Canada's Research Chair Measuring the Impact of Human Activities on Climate Change at École de Technologie supérieure intervenes. This project aims to create a digital twin of the city of Montreal where layers representing the different GHG emissions at different times will be superimposed.

This study focuses on providing recommendations taking into consideration the estimation of CO₂ emissions of the road transportation field to create the carbon map in the borough of Saint-Laurent. It is set to use the traffic modeling through AIMSUN software made from the origin/destination survey and couple it with emission estimation models: the three AIMSUN environmental models (LEM: London Emissions Model, Panis and al., 2006, and the fuel consumption model) and MOVES. These four emission estimation methods are then compared, and sensitivity analysis are performed to formulate recommendations for their usage in the carbon map. To include the traffic modeling with all AIMSUN environmental models, the modeling had to be modified from mesoscopic to microscopic scale and from Dynamic User Equilibrium (DUE) to Stochastic Route Choice (SRC) path assignment method in the carbon map.

The results show that the change in scale has the greatest impact on the inventory results. Overall, the difference is +6% in emission estimates for the microscopic SRC compared to the mesoscopic DUE. For the emission estimation methods, MOVES estimates the highest amount of CO₂ emissions (+2% compared to AIMSUN microscopic models, Panis and the fuel consumption model, and +16% compared to LEM) but it also considers more emission phenomena that represent more than 10% of the final MOVES inventory (engine preheating, accessories...).

After comparing the advantages and disadvantages of the four methods, either the AIMSUN fuel consumption model or MOVES would be recommended for the carbon map. Further research will then be necessary to study the impact of the traffic model calibration, the adaptation of its parameterization to Montreal, and the automation of the emissions calculation.

Keywords: greenhouse gases, road transport, City of Montreal, traffic modeling, emissions inventory.

TABLE DES MATIÈRES

		Page
1.1	Transport et changements climatiques.....	3
1.1.1	Changements climatiques	3
1.1.2	Impact du transport sur les changements climatiques.....	4
1.2	Quantification des émissions de gaz à effet de serre du transport routier	5
1.2.1	Inventaires territoriaux d'émissions de gaz à effet de serre.....	5
1.2.1.1	Inventaire national d'émissions de gaz à effet de serre	6
1.2.1.2	Inventaire provincial d'émissions de gaz à effet de serre	6
1.2.1.3	Inventaire Montréalais d'émissions de gaz à effet de serre	8
1.2.2	Méthodes de quantification des émissions du transport routier dans les inventaires	9
1.2.2.1	Méthode par ventes de carburant	9
1.2.2.2	Autres méthodes.....	11
1.2.3	Inventaire à haute résolution spatiale et temporelle.....	13
1.3	Modélisation des émissions du transport routier à partir d'une simulation de trafic	14
1.3.1	Modélisation de la circulation.....	16
1.3.1.1	Enquête Origine/Destination.....	16
1.3.1.2	Choix de Modélisation.....	17
1.3.1.3	AIMSUN.....	21
1.3.1.4	Autres modèles.....	23
1.3.2	Modélisation des émissions	25
1.3.2.1	AIMSUN.....	26
1.3.2.2	MOVES.....	30
1.3.3	Calibration des modélisations	32
1.4	Bilan du contexte et objectifs du mémoire	35
2.1	Modélisation de la circulation.....	39
2.1.1	Modélisation AIMSUN de la ville de Montréal	39
2.1.2	Contraintes et modifications de la modélisation AIMSUN initiale	40
2.2	Modélisation des émissions	43
2.2.1	Modèles environnementaux d'AIMSUN	43
2.2.1.1	Choix du véhicule type	44
2.2.1.2	Paramétrage du modèle de Panis et al, 2006.....	45
2.2.1.3	Paramétrage du modèle de consommation de carburant.....	46
2.2.1.4	Paramétrage du modèle LEM	46
2.2.2	Modélisation MOVES	47
2.2.2.1	Paramétrage dans l'interface MOVES	48
2.2.2.2	Paramétrage de la base de données d'entrée de MOVES	49
2.3	Analyse de sensibilité et adaptation du paramétrage	54
2.3.1	Analyse de sensibilité des caractéristiques des voitures d'AIMSUN	55
2.3.2	Analyse de sensibilité du paramétrage du modèle de consommation de carburant d'AIMSUN	57
2.3.3	Adaptation de MOVES aux conditions montréalaises.....	58

2.3.3.1	Adaptation de l'âge des véhicules.....	59
2.3.3.2	Adaptation du carburant des véhicules	60
2.3.3.3	Adaptation des données météorologiques.....	61
2.3.3.4	Adaptation du parc de véhicules et des données météorologiques	62
3.1	Modélisation de la circulation.....	63
3.1.1	Impact du changement de méthode d'affectation des chemins	63
3.1.2	Impact du changement d'échelle de modélisation	65
3.1.3	Bilan du passage de méso DUE à micro SRC	65
3.2	Modélisation des émissions	70
3.2.1	Modèles environnementaux d'AIMSUN	70
3.2.2	Inventaires d'émissions de MOVES et d'AIMSUN	72
3.3	Analyses de sensibilité et adaptation du paramétrage.....	74
3.3.1	Analyse de sensibilité des caractéristiques des voitures d'AIMSUN	74
3.3.1.1	Test de la sensibilité de la dimension des véhicules	75
3.3.1.2	Test de la sensibilité du poids des véhicules.....	79
3.3.1.3	Test des paramètres d'accélération et de décélération des véhicules	82
3.3.1.4	Bilan de l'analyse de sensibilité.....	87
3.3.2	Analyse de sensibilité du paramétrage du modèle de consommation de carburant d'AIMSUN	88
3.3.2.1	Paramètre de consommation de carburant à l'arrêt.....	89
3.3.2.2	Paramètre de consommation de carburant à la décélération.....	90
3.3.2.3	Paramètres de consommation de carburant à vitesse constante.	91
3.3.2.4	Paramètre de vitesse de consommation de carburant minimale à vitesse constante.....	92
3.3.2.5	Paramètres de consommation de carburant à l'accélération	93
3.3.2.6	Bilan de l'analyse de sensibilité.....	95
3.3.3	Adaptation du paramétrage de MOVES à Montréal.....	96
4.1	Opérationnalisation des résultats	99
4.2	Limites et perspectives.....	101
4.3	Recommandations.....	103

LISTE DES TABLEAUX

	Page	
Tableau 2.1	Détails des résultats de simulation d'AIMSUN.....	42
Tableau 2.2	Paramétrage du modèle de Panis et al, 2006 d'AIMSUN	45
Tableau 2.3	Paramétrage du modèle de consommation de carburant d'AIMSUN	46
Tableau 2.4	Paramétrage du <i>London Emissions Model</i> d'AIMSUN	47
Tableau 2.5	Types de routes dans AIMSUN et leur correspondance dans MOVES.....	50
Tableau 2.6	Distribution des distances parcourues par type de routes MOVES	50
Tableau 2.7	Les 16 Catégories de vitesse moyenne de MOVES.....	51
Tableau 2.8	Répartition des voitures dans les catégories de vitesses moyennes.....	53
Tableau 2.9	Données météorologiques de <i>Grand Isle County</i> en octobre 2018 de 7h à 8h.....	54
Tableau 2.10	Paramètres généraux des véhicules d'AIMSUN utilisés pour l'analyse de sensibilité et leurs variations	56
Tableau 2.11	Valeurs par défaut des paramètres généraux des véhicules d'AIMSUN utilisées pour l'analyse de sensibilité.....	57
Tableau 2.12	Répartition de l'âge des voitures du parc Montréalais	60
Tableau 2.13	Répartition de l'utilisation des carburants dans MOVES à partir des données de la SAAQ.....	61
Tableau 2.14	Données météorologiques de Montréal en octobre 2018.....	62
Tableau 3.1	Comparaison des résultats de la modélisation méso SRC avec celle méso DUE	64
Tableau 3.2	Comparaison des résultats de la modélisation micro SRC avec celle méso SRC.....	65
Tableau 3.3	Comparaison des résultats de la modélisation micro SRC avec celle méso DUE	66
Tableau 3.4	Différence au cours de la simulation des taux d'émissions entre LEM et les autres modèles environnementaux d'AIMSUN	72

Tableau 3.5	Inventaires d'émissions de CO ₂ calculés par MOVES et les modèles environnementaux d'AIMSUN pour la modélisation de Saint-Laurent....	73
Tableau 3.6	Résultats de l'analyse de sensibilité de la longueur des véhicules dans AIMSUN.....	76
Tableau 3.7	Résultats de l'analyse de sensibilité du poids des véhicules dans AIMSUN.....	80
Tableau 3.8	Résultats de l'analyse de sensibilité des paramètres d'accélération et de décélération des véhicules dans AIMSUN	82
Tableau 3.9	Bilan des résultats de l'analyse de sensibilité des paramètres généraux des véhicules d'AIMSUN.....	88
Tableau 3.10	Profil de vitesse des voitures de la modélisation d'Innsbruck 2015	89
Tableau 3.11	Résultats de l'analyse de sensibilité du paramètre de consommation à l'arrêt du modèle de consommation de carburant d'AIMSUN.....	89
Tableau 3.12	Résultats de l'analyse de sensibilité du paramètre de consommation à la décélération du modèle de consommation de carburant d'AIMSUN .	90
Tableau 3.13	Résultats de l'analyse de sensibilité des paramètres de consommation à vitesse constante du modèle de consommation de carburant d'AIMSUN	91
Tableau 3.14	Résultats de l'analyse de sensibilité du paramètre de vitesse de consommation minimale à vitesse constante du modèle de consommation de carburant d'AIMSUN	93
Tableau 3.15	Résultats de l'analyse de sensibilité des paramètres de consommation à l'accélération du modèle de consommation de carburant d'AIMSUN.....	94
Tableau 3.16	Bilan des résultats de l'analyse de sensibilité des paramètres du modèle de consommation de carburant d'AIMSUN.....	95
Tableau 3.17	Bilan des résultats de l'analyse de l'impact de l'adaptation des paramètres de MOVES à Montréal par rapport à la première modélisation MOVES.....	96

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Répartition des émissions de GES au Canada (données provenant de ECCC (2022a))6
Figure 1.2	Répartition des émissions de GES au Québec (données provenant de Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (2021a))8
Figure 1.3	Répartition des émissions de GES à Montréal (données provenant de Bureau de la transition écologique et de la résilience, Division Transport, Énergie, Bâtiment (2022)).....9
Figure 2.1	Schéma de la méthodologie du mémoire38
Figure 3.1	Évolution du nombre de voitures attendant dehors.....64
Figure 3.2	Évolution de la densité de voitures67
Figure 3.3	Évolution du comptage en entrée des voitures68
Figure 3.4	Émissions totales de CO ₂ calculées par LEM.....69
Figure 3.5	Variation des émissions de CO ₂ calculées par le modèle LEM.....69
Figure 3.6	Variation des émissions de CO ₂ calculées par les trois modèles environnementaux d'AIMSUN70
Figure 3.7	Émissions totales de CO ₂ des voitures pour les 3 modèles environnementaux d'AIMSUN71
Figure 3.8	Distances parcourues par les voitures sortis des simulations de l'analyse de sensibilité de la longueur des véhicules77
Figure 3.9	Retard accumulé par les voitures des simulations de l'analyse de sensibilité de la longueur des véhicules78
Figure 3.10	Émissions de CO ₂ des voitures calculées par LEM pour les tests de l'analyse de sensibilité de la longueur des véhicules79
Figure 3.11	Émissions de CO ₂ des voitures calculées par le modèle de consommation de carburant pour les tests de l'analyse de sensibilité du poids des véhicules81

Figure 3.12	Distances parcourues par les voitures sortis des simulations de l'analyse de sensibilité du poids des véhicules	81
Figure 3.13	Émissions de CO ₂ des voitures calculées par le modèle de LEM pour les tests de l'analyse de sensibilité des paramètres d'accélération et de déclaration des véhicules	84
Figure 3.14	Émissions de CO ₂ des voitures calculées par le modèle de Panis pour les tests de l'analyse de sensibilité des paramètres d'accélération et de déclaration des véhicules	85
Figure 3.15	Émissions de CO ₂ des voitures calculées par le modèle de consommation de carburant pour les tests de l'analyse de sensibilité des paramètres d'accélération et de déclaration des véhicules.....	85
Figure 3.16	Temps de parcours total des voitures à l'intérieur des simulations de l'analyse de sensibilité des paramètres d'accélération et de décélération des véhicules.....	86
Figure 3.17	Vitesses moyennes des voitures de l'analyse de sensibilité des paramètres d'accélération et de décélération des véhicules.....	86
Figure 3.18	Variation de la consommation de carburant au cours des simulations testant la sensibilité du paramètre de consommation à l'arrêt	90
Figure 3.19	Variation de la consommation de carburant au cours des simulations testant la sensibilité du paramètre de consommation à la décélération	91
Figure 3.20	Variation de la consommation de carburant au cours des simulations testant la sensibilité des paramètres de consommation à vitesse constante	92
Figure 3.21	Variation de la consommation de carburant au cours des simulations testant la sensibilité de la vitesse de consommation de carburant minimale à vitesse constante.....	93
Figure 3.22	Variation de la consommation de carburant au cours des simulations testant la sensibilité des paramètres de consommation à l'accélération ...	94
Figure 3.23	Répartition de l'âge des véhicules (automobiles et camions légers) à Montréal en 2018 à partir de l'année du modèle de la base de données de la SAAQ	97

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AIMSUN	Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and non-urban Networks
ARTM	Autorité Régionale de Transport Métropolitain
<i>CO</i>	Monoxyde de carbone
<i>CO₂</i>	Dioxyde de carbone
DTA	Dynamic Traffic Assignments
DUE	Dynamic User Equilibrium
E-85	Ethanol
ECCC	Environnement et Changement climatique Canada
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat
GPC	Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventory
HC	Hydrocarbures
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LEM	London Emission Model
MOVES	MOtor Vehicle Emission Simulator
MTQ	Ministère des Transports du Québec
<i>NO_x</i>	Oxydes d'azote
O/D	Origine/Destination
PARAMICS	Parallel Microscopic Simulation of road
PEMS	Portable emissions measurement systems
PHEM	Passenger car and Heavy-duty vehicle Emission Model

<i>RunSpec</i>	Run Specifications
SAAQ	Société de l'Assurance Automobile du Québec
SQL	Structured Query Language
SRC	Stochastic Route Choice
STA	Static Traffic Assignments
STM	Société de transport de Montréal
SUM	Service de l'urbanisme et la mobilité
USEPA	U.S. Environmental Protection Agency
VMT	Vehicle-Miles Traveled
VSP	Vehicle Specific Power
VUS	Véhicule utilitaire de sport

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

m	mètre
km	kilomètre
l ou L	litre
ml	millilitre
g	gramme
kg	kilogramme
t	tonne
t éq. CO ₂	tonne équivalent CO ₂
°C	degré celsius
°F	degré fahrenheit
s	seconde
h	heure
m/s	mètre par seconde
m/s ²	mètre par seconde carrée
km/h	kilomètre par heure
mph	mile par heure
l/km	litre par kilomètre
g/km	gramme par kilomètre
kg/km	kilogramme par kilomètre
s/km	seconde par kilomètre
ml/s	millilitre par seconde
g/s	gramme par seconde

INTRODUCTION

Les émissions de gaz à effet de serre (GES) anthropiques sont à l'origine des changements climatiques observés actuellement et c'est le dioxyde de carbone (CO₂) qui est le principal GES émis par les activités humaines à ce jour (IPCC, 2021). Au Canada, comme au Québec ou à Montréal, c'est le secteur du transport, et plus particulièrement le transport routier, qui est le principal secteur émetteur de CO₂. Il représente donc un levier important afin de réduire les émissions de GES et d'ainsi respecter les accords de Paris en maintenant le réchauffement global de la planète en dessous de 1,5 °C par rapport au niveau préindustriel.

Les villes concentrent aujourd'hui plus de 55 % de la population mondiale (La Banque Mondiale, 2020) et sont responsables de 78 % des émissions de carbone anthropiques (Nations Unies, s. d.). Par conséquent, elles permettent de légiférer plus rapidement et plus spécifiquement en visant les sources d'émissions les plus importantes. En ce sens, la ville de Montréal s'engage à réduire ses émissions de GES de 55 % sous le niveau de 1990 d'ici 2030 et vise la carboneutralité pour 2050 (Ville de Montréal, 2020). Pour ce faire, les villes ont besoin d'inventaires d'émissions de GES réguliers et leur permettant de distinguer les différentes sources d'émissions. À Montréal, ces inventaires sont effectués tous les ans depuis 2013 et la dernière parution est l'inventaire de GES de 2018. Pour les émissions du transport routier, ils utilisent la valeur des ventes de carburant au Québec qu'ils multiplient par le ratio des véhicules immatriculés sur le territoire de la Ville. Cette estimation est donc peu fiable et manque de précision sur la source des émissions. En ce sens, un inventaire des émissions de GES à haute résolution spatiale et temporelle de la ville de Montréal serait un atout pour la lutte contre le changement climatique et l'atteinte des objectifs qu'elle s'est fixés. Ce type d'inventaire permettrait, aux décideurs, de mieux appréhender les sources d'émissions ainsi que les paramètres les affectant afin de prioriser les réductions d'émissions. C'est dans cet objectif qu'intervient 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 à l'École de technologie supérieure. Cette carte carbone a pour but de produire un inventaire à haute résolution temporelle et spatiale avec l'avantage supplémentaire d'être simple à lire et à

utiliser. Elle permettra de représenter, sous forme de surcouche sur un jumeau numérique de la ville de Montréal, l'évolution des émissions de GES en fonction du temps. Elle pourra ensuite être utilisée par les décideurs politiques et les gestionnaires des villes, ainsi qu'à des fins d'éducation et de sensibilisation auprès du grand public.

Le but de ce mémoire est de tester et de comparer différentes méthodes d'estimation des émissions de CO₂ du transport routier afin de faire des recommandations pour la carte carbone. Le premier objectif est d'identifier des sources de données et d'évaluer dans quelles mesures elles pourront être exploitées pour le projet de carte carbone. L'une des sources de données est la modélisation de la circulation dans le logiciel AIMSUN créée par le service de l'urbanisme et la mobilité à partir de l'enquête origine/destination de l'Autorité Régionale de Transport Métropolitain (ARTM). Le deuxième objectif est de coupler ces résultats avec des modélisations d'émissions de CO₂. Pour cela, les modèles environnementaux implantés dans le logiciel AIMSUN seront comparés avec le logiciel MOVES de l'Environmental Protection Agency des États-Unis (USEPA). Le dernier objectif est d'étudier la sensibilité de ces modèles à leur paramétrage afin de déterminer quelles sont les données d'entrée clés.

Ce mémoire s'articule comme suit. Tout d'abord, une revue de la littérature est conduite sur les changements climatiques et l'impact du transport routier. Les méthodes de quantification de GES existantes ou utilisées de nos jours à différentes échelles sont identifiées. Enfin, les logiciels de modélisation de trafic et les modélisations d'émissions de GES sont étudiés ainsi que leurs méthodologies de couplage afin d'effectuer un inventaire à haute résolution spatiale et temporelle. Le deuxième chapitre traite de la méthodologie du mémoire avec les modélisations du trafic qui ont été effectuées, les modélisations des émissions de CO₂, et leurs analyses de sensibilité. L'analyse des résultats des modélisations de trafic et d'émissions est réalisée au troisième chapitre. Elle comprend l'interprétation de ces derniers ainsi que des conclusions sur les analyses de sensibilité des paramètres de modélisation. Finalement, le dernier chapitre aborde la discussion et les recommandations découlant des comparaisons des analyses effectuées. Ce mémoire est clôturé par une conclusion sur ses objectifs et les travaux à faire dans le futur.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Dans un premier temps, ce chapitre présente les enjeux actuels autour du transport et des changements climatiques. Compte tenu de l'importance de ces enjeux, il est ensuite détaillé comment les émissions de gaz à effet de serre (GES) responsables des changements climatiques sont actuellement estimées à différentes échelles, en particulier pour le secteur du transport. S'en suivra une justification de l'intérêt des inventaires d'émissions à haute résolution spatiale et temporelle ainsi qu'une description des méthodes de modélisations des émissions du transport routier à partir de simulations du trafic.

1.1 Transport et changements climatiques

Le transport est un des grands enjeux de nos sociétés modernes car il engendre de nombreux impacts sur l'environnement. Il est, entre autres, l'un des secteurs qui contribue le plus à l'intensification des phénomènes de changements climatiques que subit notre planète depuis plusieurs décennies.

1.1.1 Changements climatiques

L'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) définit le climat comme la mesure et l'analyse statistique, sur une longue période, généralement 30 ans, des phénomènes météorologiques tels que la température, les précipitations ou le vent (OMM, 2022).

Comme l'a rappelé le sixième rapport du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) (IPCC, 2021), le climat se réchauffe à cause des émissions de GES anthropiques et ces quatre dernières décennies ont été les plus chaudes depuis 1850. Il continuera de se réchauffer à cause des activités humaines dans les années à venir et son

réchauffement est plus de deux fois plus important que la moyenne mondiale au Canada (Bush & Lemmen, 2019). Ce réchauffement global entraînera de nombreux impacts comme une augmentation de la fréquence des événements de chaleur extrême, des modifications des précipitations, la fonte des glaciers et des calottes polaires ainsi que l'augmentation du niveau et de l'acidité des océans (Bush & Lemmen, 2019).

Le réchauffement climatique actuel est dû à l'augmentation de la concentration en GES dans l'atmosphère qui accentue l'effet du forçage radiatif. Les principaux GES sont la vapeur d'eau, le CO₂, le méthane, le protoxyde d'azote et l'ozone. Ces GES retiennent une partie de l'énergie du rayonnement solaire dans l'atmosphère, ce qui permet d'avoir une température terrestre moyenne de 15 °C au lieu de – 16 °C sans ce phénomène. Ils sont naturellement présents dans l'atmosphère et sont nécessaires à la vie sur terre. Les principaux GES sont le dioxyde de carbone (CO₂) et la vapeur d'eau. Depuis la révolution industrielle, la concentration de ces gaz dans l'atmosphère augmente à cause des activités humaines, principalement avec la combustion de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel), la déforestation ou la fabrication de ciment (Bush & Lemmen, 2019).

Afin d'agir pour limiter le réchauffement global du climat de la planète, le Québec s'engage à réduire ses émissions de GES de 37,5 % par rapport à 1990 d'ici à 2030 et a pour objectif d'être neutre en carbone en 2050 (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, s. d). La ville de Montréal s'engage aussi à son échelle à réduire ses émissions de GES. Parmi les engagements qu'elle a pris ces dernières années, elle a, entre autres, pour objectif de réduire de 55 % sous le niveau de 1990 ses émissions des GES d'ici 2030 afin de viser la carboneutralité pour 2050 (Ville de Montréal, 2020).

1.1.2 Impact du transport sur les changements climatiques

Parmi les GES présents dans l'atmosphère, le CO₂ n'est pas celui entraînant le forçage radiatif le plus élevé, mais c'est le plus émis par les activités humaines actuellement (77,3 % des

émissions de GES au Québec en 2019). D'après l'inventaire Québécois des émissions de gaz à effet de serre de 2019, le premier secteur émetteur de CO₂ au Québec est le transport avec 54,9 % des émissions de CO₂ en 2019. Parmi les émissions de tous les GES au Québec, le transport routier est aussi le secteur le plus émetteur avec 34,4 % des émissions de GES en 2019 et celui-ci est en augmentation durant ces dernières années : + 8,1 % entre 2015 et 2019, dont + 1,9 % entre 2018 et 2019 (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2021a).

Les émissions de CO₂ du secteur du transport représentent donc la majorité de l'impact du Québec sur le changement climatique d'où l'importance de sa réduction dans les années à venir.

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

Afin de pouvoir légiférer dans le but de réduire les émissions de CO₂ du secteur du transport, la première étape est de quantifier ces émissions. Ces inventaires peuvent être faits à plusieurs échelles et différentes méthodes existent présentement afin de les estimer.

1.2.1 Inventaires territoriaux d'émissions de gaz à effet de serre

Pour le calcul des émissions de GES, les lignes directrices de 2006 du GIEC suggèrent d'effectuer le calcul en équation (1.1).

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

Où DA = données d'activité et FE = facteur d'émission (GIEC, 2006).

Ce type de calcul s'adapte à des inventaires pour des territoires de différentes échelles. Actuellement, il y a des inventaires faits à l'échelle nationale au Canada, à l'échelle provinciale pour le Québec, et à l'échelle municipale pour la ville de Montréal.

1.2.1.1 Inventaire national d'émissions de gaz à effet de serre

L'inventaire National des émissions de GES du Canada suit les directives de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques. Il est effectué tous les ans, le dernier étant celui de 2020. D'après l'inventaire de 2020 (voir Figure 1.1), 29 % des émissions de GES proviennent du transport, ce qui en fait la deuxième source derrière les sources de combustion fixes. Dans le secteur du transport, à peu près 69 % des émissions proviennent du secteur du transport routier. De plus, 80 % des GES émis au Canada sont du CO₂ (Environnement et Changement climatique Canada, 2022a).

Avec la pandémie de covid-19 en 2020, les émissions du transport ont subi une légère baisse. En 2019, elles représentaient 30 % des émissions totales du pays dont 70 % sont dues au transport routier.

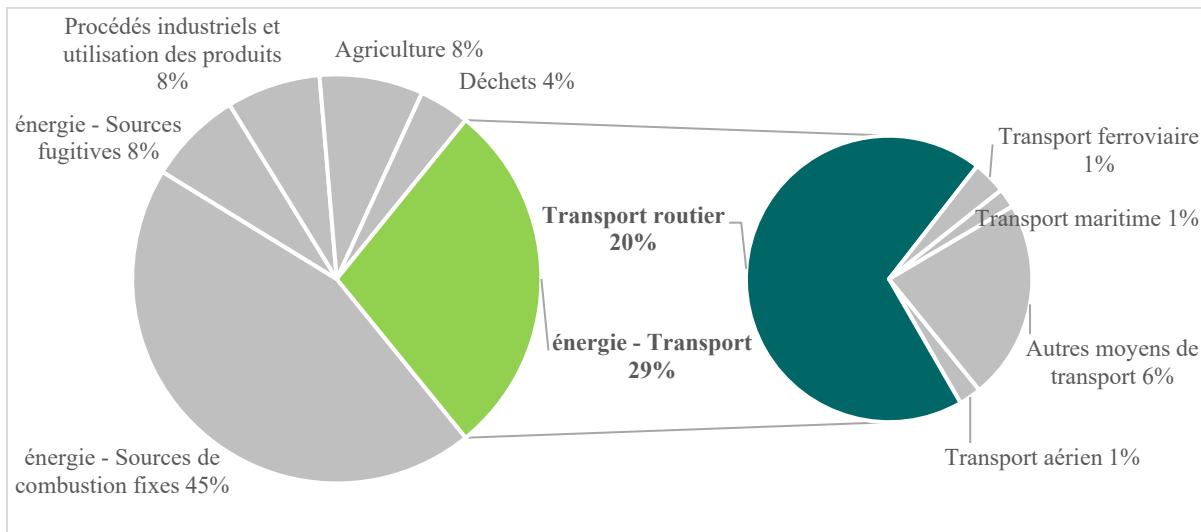


Figure 1.1 Répartition des émissions de GES au Canada (données provenant de ECCC (2022a))

1.2.1.2 Inventaire provincial d'émissions de gaz à effet de serre

L'inventaire provincial du Québec est effectué tous les ans depuis 2002 et le premier rapport a été fait pour les années 1990 à 2000 (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, s. d. b). Les estimations d'émissions sont basées sur les déclarations

faites par les entreprises et les organismes municipaux du Québec dont l'exploitation émet 10 000 t éq. CO₂ ou plus par an, ainsi que sur les données statistiques du Québec (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2021b). D'après cet inventaire, comme expliqué en 1.1.2, le secteur du transport routier est le principal secteur d'émission de la province et les émissions de ce secteur sont en augmentation cette dernière décennie (voir Figure 1.2) (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2021a). Le secteur du transport routier détaille les émissions par type de véhicules : les automobiles, les camions légers, les véhicules lourds et les autres types de véhicules (motocyclettes, véhicules au propane ou au gaz naturel). Même si, en 2019, la part des émissions provenant des automobiles, des camions légers et des véhicules lourds est assez proche, celle des automobiles est en légère diminution alors que celle des deux autres est en augmentation depuis 1990. En effet, ces dernières années, il y a de moins en moins d'automobiles immatriculées à la Société de l'Assurance Automobile du Québec (SAAQ), alors que le nombre de camions légers ne cesse d'augmenter (+ 5,5 % de véhicules immatriculés entre 2018 et 2019). La catégorie de camions légers comprend les fourgonnettes, les camionnettes et les véhicules utilitaires sport (VUS) qui sont, généralement, plus consommateurs de carburant que les automobiles.

Bien que le nombre d'immatriculations ne représente pas la distance parcourue par ces véhicules, il est logique de voir les émissions du transport routier augmenter avec le remplacement, par les conducteurs, des automobiles par des camions légers.

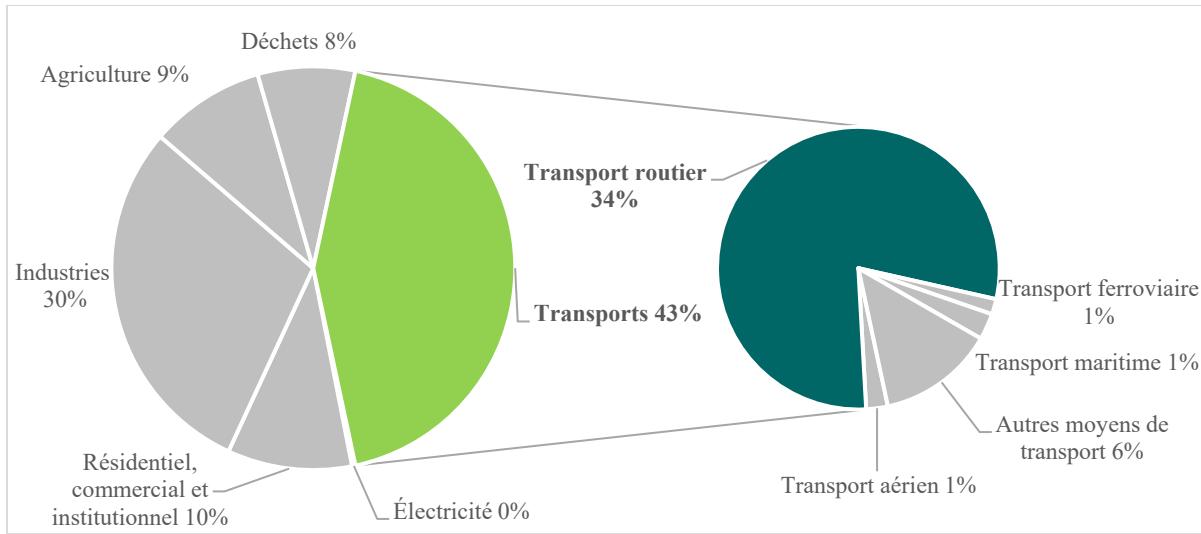


Figure 1.2 Répartition des émissions de GES au Québec (données provenant de Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (2021a))

1.2.1.3 Inventaire Montréalais d'émissions de gaz à effet de serre

L'inventaire de la ville de Montréal est réalisé tous les ans depuis 2013, le dernier étant celui de 2018. Cet inventaire respecte les lignes directrices du document méthodologique *Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventory* (GPC) (Fong et al., 2021) inspiré des recommandations du GIEC de 2006. Le GPC permet aux villes ou aux gouvernements d'avoir une méthode standardisée, solide et transparente (Bureau de la transition écologique et de la résilience, Division Transport, Énergie, Bâtiment, 2022).

Les émissions de la collectivité montréalaise, tous secteurs confondus, représentent 14 % des émissions de la province du Québec pour 23 % de sa population (Bureau de la transition écologique et de la résilience, Division Transport, Énergie, Bâtiment, 2022 ; Institut de la statistique du Québec, s.d.). Parmi ces émissions, 39 % sont associées au secteur du transport dont 73 % au transport routier, ce qui en fait le premier sous-secteur d'émissions de la collectivité (voir Figure 1.3). Même si, en 2018, les émissions de GES de la ville de Montréal ont baissé de 26 % par rapport à 1990, celles du secteur du transport ont augmenté de 5 %. Pour le transport routier plus spécifiquement, elles ont diminué de seulement 4 %. Comme à

l'échelle provinciale, le nombre d'automobiles immatriculées à Montréal a diminué ces dernières années alors que celui des camions légers est en forte augmentation.

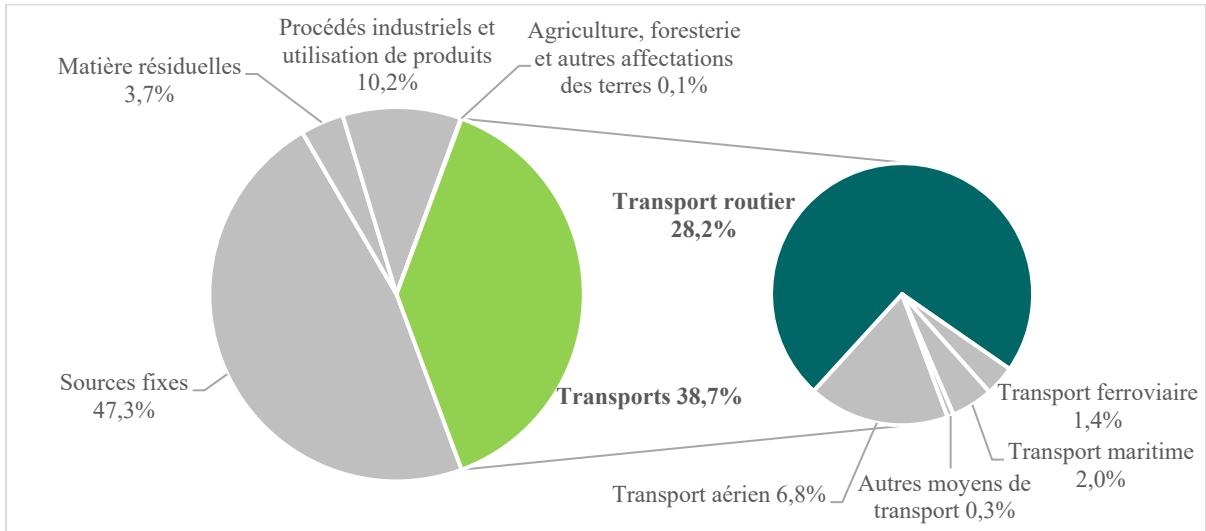


Figure 1.3 Répartition des émissions de GES à Montréal (données provenant de Bureau de la transition écologique et de la résilience, Division Transport, Énergie, Bâtiment (2022))

1.2.2 Méthodes de quantification des émissions du transport routier dans les inventaires

À partir des différentes lignes directrices (GIEC, 2006; Fong et al., 2021), les inventaires d'émissions du transport routier peuvent être faits par différentes méthodes. Deux approches sont possibles selon le GPC : l'approche ascendante (« bottom-up ») ou descendante (« top-down ») (Fong et al., 2021). La méthodologie utilisant la consommation de carburant des véhicules est une approche descendante. À l'inverse, un inventaire basé sur les déplacements de véhicules est une méthode ascendante.

1.2.2.1 Méthode par ventes de carburant

Cette méthode d'estimation d'émissions de GES pour le secteur du transport routier, inspirée du GPC (Fong et al., 2021), est utilisée pour l'inventaire national du Canada, provincial du

Québec, et municipal de la ville de Montréal. L'avantage d'un tel inventaire est qu'il est simple, relativement rapide à faire, et peu coûteux. Ces atouts rendent la méthode d'inventaire accessible à différents territoires. Les résultats d'inventaires de ces territoires sont alors comparables puisque basés sur la même méthode. En revanche, ils peuvent être incomplets ou erronés, en particulier pour les petits territoires d'étude. En effet, cette méthode ne tient pas compte des véhicules circulant dans la zone considérée mais ayant acheté leur carburant à l'extérieur, ou, à l'inverse, ayant acheté leur carburant dans la zone pour circuler en dehors. À l'échelle provinciale ou nationale, l'erreur engendrée est relativement faible, mais elle est nettement plus importante à l'échelle d'une municipalité où il y a plus de déplacements entrant ou sortant de la zone d'étude. Elle ne permet pas non plus d'avoir une grande précision ni sur la raison des déplacements, ni sur leur localisation spatiale ou temporelle.

À l'échelle nationale, les volumes de carburants vendus sont obtenus par l'enquête annuelle sur l'utilisation finale des produits pétroliers raffinés (Statistique Canada, 2021) qui est faite auprès de tous les revendeurs. Malgré l'obligation de répondre à l'enquête, le taux de réponse est de 70 %, ce qui induit une erreur dans le résultat final. Les valeurs de l'enquête sont comparées aux résultats des autres enquêtes effectuées dans le cadre du bulletin sur la disponibilité et écoulement d'énergie au Canada afin qu'elles soient cohérentes (Statistique Canada, 2021).

À l'échelle provinciale, le Québec s'inspire des résultats d'Environnement et Changement climatique Canada afin de dresser son propre inventaire d'émissions de GES. En se basant sur les données de Statistique Canada, ils effectuent le calcul de l'équation (1.2) puis multiplient le résultat par un facteur d'émissions.

$$Q_c = N_v \cdot D_m \cdot C_c \quad (1.2)$$

Où Q_c (en L) est la quantité de combustibles utilisés, N_v le nombre de véhicules de la catégorie, D_m (en km) la distance moyenne annuelle parcourue, et C_c (en l/km) le taux de consommation de carburant (Ministère de l'Environnement du Québec, 2002).

À l'échelle municipale finalement, la ville de Montréal applique une méthode basée sur la consommation d'énergie des véhicules. Quelques changements ont été effectués au fur et à mesure des années, mais dans l'inventaire d'émissions de 2009 (Direction de l'environnement du Service des infrastructures, du transport et de l'environnement, 2013), il est expliqué que leur méthode utilise la valeur des ventes de carburant du Québec qu'ils multiplient par le ratio des véhicules immatriculés sur le territoire de la ville par rapport à ceux de la province d'après les données de la SAAQ. Il est donc supposé que la composition du parc de véhicules ainsi que leur distance annuelle parcourue est uniforme à travers le territoire québécois.

1.2.2.2 Autres méthodes

D'après le GPC (Fong et al., 2021), une autre méthode de calcul d'émissions possible est l'approche ascendante. Selon le GPC, par rapport à l'approche descendante, pour être mise en place, elle nécessite plus de données, de temps et de moyens technologiques et donc financiers. De plus, cette méthode est bien souvent différente en fonction des localités, ce qui rend la comparaison des résultats d'inventaires d'émissions plus incertaine. En revanche, elle permet une haute résolution spatiale et temporelle. Il est, ainsi, plus facile de retracer l'origine des émissions et donc d'identifier les leviers d'atténuation.

Depuis 2015, afin d'affiner le détail de la provenance des émissions pour le transport routier dans l'inventaire national, Environnement et Changement Climatique Canada (ECCC) utilise aussi une modélisation des émissions obtenues avec le logiciel MOror Vehicle Emission Simulator (MOVES) mise au point par le Environmental Protection Agency des États-Unis (USEPA). Ils utilisent différentes sources de données afin de paramétriser la modélisation MOVES. Par exemple, pour les distances annuelles parcourues par les véhicules, il est utilisé le taux d'accumulation de kilométrage provenant des relevés d'odomètres effectués lors des programmes d'inspections et d'entretien des véhicules en Ontario et en Colombie-Britannique. En outre, le taux de mise en ferraille et de croissance est utilisé pour connaître la population de chacune des classes de véhicules selon leur âge. Cette méthodologie d'inventaire ascendante

permet de distinguer les émissions du secteur du transport routier provenant de la consommation sur route et hors de la route (sur les stationnements ou terrains privés par exemple). La consommation de carburant estimée par cette méthode ascendante est ensuite mise à l'échelle avec les résultats du bulletin sur la disponibilité et écoulement d'énergie au Canada dans l'inventaire national d'émissions. Cependant, ce sont les résultats de la méthode descendante qui sont gardés (Environnement et Changement climatique Canada, 2022b), mais l'approfondissement et l'adaptation de cette méthodologie pourrait être utilisé dans l'inventaire pour le Canada. Cela aurait aussi, sûrement, des répercussions sur l'inventaire provincial qui s'inspire des méthodes de l'inventaire national.

La ville de Montréal a elle aussi déjà fait des estimations d'émissions de GES avec la méthode ascendante avec l'aide de la Société de transport de Montréal (STM). En effet, dans le *Rapport de quantification des émissions de gaz à effet de serre évitées par le transport collectif dans la région métropolitaine de Montréal*, les enquêtes origine destination de 2008 et 2013 ont été utilisées pour déduire les émissions de GES des résidents de la Communauté Métropolitaine de Montréal (STM & Comité de Pilotage pour la Quantification des émissions de GES évitées dans la région de Montréal, 2016). Cette analyse utilise une méthode différente de l'inventaire municipal classique. En effet, l'inventaire municipal classique ne permet pas d'anticiper l'effet d'actions visant à réduire les émissions du transport routier telles que le transfert de l'automobile individuelle vers le transport en commun, ou, au contraire, l'effet de phénomènes pouvant augmenter ces émissions comme la croissance démographique. Dans l'un des inventaires effectués, le taux de consommation de carburant (L/km) est calculé avec MOVES. Cette modélisation MOVES est adaptée à Montréal dans le sens où elle prend en entrée la composition du parc de véhicules montréalais, ses conditions météorologiques, et qu'elle utilise les données de déplacement du modèle EMME (logiciel de modélisation de trafic) du ministère des Transports du Québec (MTQ). Ce dernier a été développé à partir des résultats de l'enquête origine/destination. Ensuite, les données de déplacement et les facteurs d'émissions de MOVES pour une journée typique d'automne sont multipliés, puis les résultats obtenus sont annualisés (par exemple, avec un facteur estimé à partir de l'achalandage des

métros et des bus de la STM considéré comme représentatif de l'achalandage pour tous les modes de transport).

1.2.3 Inventaire à haute résolution spatiale et temporelle

Comme expliqué en 1.2.1, la grande majorité des inventaires d'émissions de CO₂ faits actuellement donnent des résultats par an avec une précision spatiale de l'ordre de la région. Ils reposent bien souvent sur la répartition des immatriculations des véhicules et des lieux de vente de carburant. Un inventaire à haute résolution spatiale et temporelle permettrait d'avoir une actualisation des émissions par heure et un détail par section de route ou quartier de la ville. Un tel inventaire a de nombreux avantages. Il permet de prioriser les objectifs de réduction d'émissions de GES en fonction de ce qui a le plus d'impact. Il donne aussi la possibilité de faire des corrélations entre des pics d'émissions à un certain moment et des conditions particulières (météorologiques, sociétales...) et donc de pouvoir justifier les mesures. Finalement, la connaissance des zones les plus émettrices d'une agglomération permet de conduire les projets d'urbanisme en conséquence.

En ce sens, 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 à l'École de technologie supérieure, a pour but de produire un inventaire à haute résolution temporelle et spatiale avec l'avantage supplémentaire d'être simple à lire et à utiliser. L'objectif final de ce projet est de représenter, sous forme de surcouche sur un jumeau numérique de la ville de Montréal, l'évolution des émissions de GES en fonction du temps. Elle servira ensuite, à la fois aux décideurs politiques et aux gestionnaires des villes, mais aussi à des fins d'éducation et de sensibilisation auprès du grand public.

Dans la ville d'Indianapolis dans l'état de l'Indiana aux États-Unis, les chercheurs du projet HESTIA ont déjà essayé de mettre en place un inventaire à haute résolution spatiale et temporelle pour toutes les émissions de CO₂ de la ville (Gurney et al., 2012). D'après leur

étude, les stratégies globales de baisse des émissions de CO₂ nécessitent des stratégies à l'échelle micro pour être atteintes, ce qui justifie aussi la nécessité de faire des estimations d'émissions à cette même échelle. Le Projet Hestia consiste en la mise en place d'une méthode ascendante pour quantifier les émissions de CO₂ provenant de combustibles fossiles, à l'échelle des bâtiments individuels, des portions de route ou des quartiers, avec une résolution temporelle horaire pour la zone urbaine d'Indianapolis. Pour cela, il y est utilisé différentes séries de données et outils de simulation sur le trafic routier, la pollution atmosphérique locale, la production d'électricité, et la consommation des bâtiments. Leurs conclusions montrent que la méthode développée peut être utilisée dans des villes équivalentes en adaptant les données. De plus, même s'ils précisent que leur but n'est pas de remplacer les rapports d'émission nationaux, ils démontrent que leurs résultats sont cohérents avec ceux des estimations classiques faites à partir des données de consommation locale de combustibles fossiles.

1.3 Modélisation des émissions du transport routier à partir d'une simulation de trafic

Afin d'effectuer un inventaire d'émissions de GES du secteur du transport routier à haute résolution spatiale et temporelle, on étudie ici la possibilité de le faire à partir d'un modèle de trafic. Cette méthodologie d'inventaire s'effectue en trois étapes : premièrement, il faut obtenir les données de trafic à partir de relevés. À l'aide de ces données et d'un logiciel de modélisation, il faut simuler le trafic de la manière la plus représentative possible de la réalité. Finalement, il faut estimer les émissions de CO₂ associées au trafic modélisé grâce à un modèle de calcul d'émissions.

De nombreuses études ont déjà été réalisées en couplant un logiciel de modélisation de trafic et un logiciel d'estimation d'émissions (entre autres : Fontes, Pereira, Fernandes, Bandeira, & Coelho, 2015; Abou-Senna, Radwan, Westerlund, & Cooper, 2013; Lin, Chiu, Vallamsundar, & Bai, 2011; Swidan, 2011; Wyatt, 2017; Xie, Chowdhury, Bhavsar, & Zhou, 2011). L'avantage d'un modèle utilisant à la fois un logiciel de simulation de trafic et une méthode de calcul d'émissions de GES est qu'il permet d'obtenir des résultats d'inventaire avec une

haute résolution temporelle, spatiale et de la source d'émission. Une fois les modèles créés, il est aussi relativement facile de les mettre à jour, ce qui rend possible la visualisation des émissions et leurs variations presque en temps réel (Wyatt, 2017). Par exemple, dans sa thèse, Wyatt utilise AIMSUN pour modéliser le trafic et *Passenger car and Heavy duty vehicle Emission Model* (PHEM), un logiciel européen de modélisation des émissions instantanées équivalent à MOVES. En comparant ses résultats de simulation avec des mesures en conditions réelles de trafic, il démontre que ceux-ci sont proches et donc que ses modélisations sont représentatives des émissions dans le monde réel (environ 10 % de différence au total). D'autres études ont été faites en comparant les résultats d'une modélisation de trafic couplée à une estimation d'émissions à des mesures en conditions réelles de trafic. On retrouve, par exemple, celle de Swidan qui utilise AIMSUN et une méthode proche de celle de MOVES pour calculer les émissions et trouve une différence d'environ $\pm 10\%$ avec les mesures en conditions réelles de circulation (Swidan, 2011). Plusieurs études insistent sur la nécessité de faire ces modélisations de trafic et d'émission à l'échelle microscopique. Celle d'Abou-Senna et al. (2013), couple l'un des logiciels de simulation de trafic les plus utilisés, VISSIM, avec le logiciel d'estimation d'émission MOVES. Ils étudient les émissions de différents GES avec une simulation à l'échelle micro d'une portion de voie rapide à accès restreint à Orlando aux États-Unis. Ils en concluent que l'utilisation de l'échelle micro est nécessaire afin de capter les accélérations des véhicules puisque les émissions de GES y sont très sensibles. Des analyses de réseaux routiers plus importants à l'échelle micro existent aussi dans la littérature. Dans l'étude menée par Fontes et al. (2015), ils comparent différentes méthodes et outils permettant d'estimer l'impact du transport routier sur l'environnement, à l'échelle micro. L'étude est effectuée à l'échelle d'une ville moyenne d'Europe. L'analyse de Xie et al. (2012) est faite à partir d'une modélisation de Greenville en Caroline du Sud aux États-Unis. Ils utilisent les logiciels PARAMICS pour la simulation du trafic et MOVES pour les émissions afin d'étudier l'impact du changement de carburant (éthanol, électricité et gaz naturel compressé) sur les émissions de GES du transport routier. Enfin, le principal frein à l'utilisation d'une méthodologie de couplage d'un logiciel de modélisation de trafic avec un logiciel de modélisation d'émissions peut être le transfert de données entre l'un et l'autre. En effet, les formats de sortie du logiciel de trafic et d'entrée d'un logiciel comme MOVES sont souvent

différents et peuvent être longs à faire correspondre. Des solutions ont été trouvées afin de faciliter cette étape. Entre autres, dans l'étude de Lin et al. (2011), ils automatisent la récupération et le formatage des données en sortie d'un logiciel de modélisation de trafic afin qu'elles soient adaptées à l'entrée dans MOVES.

1.3.1 Modélisation de la circulation

Cette section regroupe l'explication des deux premières étapes de la méthode de l'inventaire d'émissions de GES du transport routier décrit au-dessus. La première étape est donc la récupération des données qui se fait ici grâce au traitement des résultats de l'enquête origine/destination effectué par le service de l'urbanisme et la mobilité (SUM) de la ville de Montréal. La deuxième étape est la modélisation de ces données à l'aide du logiciel de modélisation de trafic AIMSUN. Ce logiciel a été choisi puisque c'est celui utilisé par SUM. Dans ce logiciel, différents calculs de prévision de trafic, échelles et types de modélisation sont possibles à partir des données d'entrée de demande de déplacements.

1.3.1.1 Enquête Origine/Destination

L'enquête Origine/Destination (O/D) est réalisée tous les cinq ans depuis 1970, par l'Autorité Régionale de Transport Métropolitain (ARTM) et la dernière en date est celle de 2018. C'est la plus vaste enquête sur la mobilité réalisée au Québec, elle est effectuée auprès de 73 400 ménages (3,89 % des ménages du territoire), environ 147 200 personnes et recensent 357 800 déplacements. Pour celle de 2018, les données proviennent en partie d'un questionnaire web, mais surtout d'entrevues téléphoniques auprès d'utilisateurs du réseau ainsi que des données partagées par les partenaires tels que la Communauté Métropolitaine de Montréal et les compagnies de transport collectif de la collectivité montréalaise. Elle représente une journée de semaine classique d'automne et les participants sont sélectionnés au hasard. Les caractéristiques des déplacements (adresse, mode de transport, heure de départ) des membres du ménage âgés de plus de 4 ans sont récoltées ainsi que les informations sociodémographiques

de leur ménage. Le territoire étudié correspond au territoire de l'ARTM élargi aux communes alentour pour un total de 158 municipalités (Autorité Régionale de Transport Métropolitain, 2018).

Les résultats de l'enquête sont ensuite utilisés pour planifier les réseaux de transport et adapter au mieux les infrastructures aux demandes des utilisateurs. Le SUM s'appuie sur ces résultats pour réaliser une modélisation de la circulation sur l'île de Montréal sur le logiciel de modélisation de trafic AIMSUN. Elle représente les heures de pointe du matin et du soir lors d'une journée classique en semaine au cours de l'automne.

1.3.1.2 Choix de Modélisation

À partir des données de l'enquête O/D, il est possible d'identifier des pôles de départ et d'arrivée et de créer des matrices origine/destination aux différents pôles. L'ensemble de ces matrices constitue la demande en déplacements totale du modèle.

Dans ce modèle, il faut aussi créer un réseau routier avec différents segments et intersections reliant les pôles de départ et d'arrivée. Suivant les logiciels de modélisation de trafic, il est possible de mettre plus ou moins de détails sur ces segments de route et ces intersections comme, entre autres, des réglementations de vitesse, de dépassement ou de changement de voies, ou des restrictions d'utilisation des voies.

Une fois les éléments de contexte implantés, il faut créer des scénarios de simulation. Il y a alors deux choix à faire : le choix de l'échelle de modélisation, et le choix de la méthode de calcul des affectations de chemins des différents véhicules à partir de la demande de déplacements du modèle.

Les trois échelles de modélisation possibles sont l'échelle microscopique, l'échelle mésoscopique, et l'échelle macroscopique. Des échelles hybrides entre ces trois niveaux peuvent aussi exister, mais elles ne sont pas étudiées ici. Les simulations à l'échelle micro et

méso sont réalisées grâce à des affectations dynamiques des déplacements (*Dynamic Traffic Assignments* ou DTA) alors que l'échelle macro utilise des affectations statiques des déplacements (*Static Traffic Assignments* ou STA).

L'échelle micro est l'échelle la plus détaillée. Dans une simulation micro, le déplacement de chaque véhicule est individuellement modélisé à chaque instant de la simulation. La position de chacun des véhicules impacte celle des autres au travers de différents sous-modèles tel que celui de poursuite (*car-following models*), celui de changement de voie (*lane-changing models*), et celui d'acceptation de créneau (*gap-acceptance models*) (Olstam et Tapani, 2004). C'est l'échelle de simulation qui est la plus longue à calculer, mais c'est aussi celle qui donne le plus de détails dans les résultats de simulation (Olstam et Tapani, 2004. Madi, 2016; Rodriguez-Rey et al., 2021). Les calculs d'inventaire d'émissions de GES basés sur une simulation à l'échelle micro peuvent ainsi prendre en compte les accélérations et les vitesses instantanées des véhicules rendant les résultats plus sensibles à l'agressivité des conducteurs et à la congestion (Abou-Senna et al., 2013). La différence de résultats d'inventaire peut être importante. Rodriguez et al. (2021) démontrent qu'entre une simulation à l'échelle macro STA et une autre à l'échelle micro DTA, il y a 65 % de différence d'estimations d'émissions de NOx lorsque la simulation est congestionnée, et 11 % lorsque que la circulation est fluide. Cependant, l'échelle micro est plus difficile à appliquer pour un réseau de grande taille, car elle nécessite nettement plus de données et de puissance de calcul (Tu, Kamel, Wang, Abdulhai, & Hatzopoulou, 2018). Certaines études ont, tout de même, réussi à l'appliquer à une ville de taille moyenne (Fontes et al., 2015).

L'échelle méso est une échelle de simulation intermédiaire. Tout comme l'échelle micro, la simulation à l'échelle méso est basée sur les véhicules individuellement, mais elle ne calcule et n'enregistre des résultats que lors de l'entrée et la sortie d'une section de route par les véhicules. Ces véhicules ne sont donc pas modélisés à chaque pas de temps de la simulation, mais la traversée d'une section de route affecte d'une certaine valeur leur trajet global en fonction des caractéristiques et de l'état des sections de route au moment de leur traversée. Des modèles de poursuite, de changement de voie, et d'acceptation de créneau sont aussi utilisés dans le calcul, mais ils sont simplifiés par rapport à l'échelle micro et sont basés sur des positions et des vitesses moyennes plutôt qu'instantanées (AIMSUN Next Users Manual, s. d.).

e). Le temps de simulation est donc réduit par rapport à l'échelle micro tout comme la précision et la variété de résultats disponibles en sortie. Les inventaires basés sur l'échelle de simulation de trafic méso sont ainsi calculés à partir des vitesses moyennes des véhicules sur les sections qu'ils traversent.

Finalement, l'échelle macro est la plus large des trois échelles. Elle permet d'avoir des résultats à l'échelle globale d'une ville sans détails sur les caractéristiques de véhicules lors de la simulation de trafic. Elle ne modélise pas individuellement les véhicules, mais plutôt les volumes de véhicules par section ainsi que les flux et vitesses moyennes sur celles-ci. Le temps de calcul est donc nettement plus rapide, mais les résultats sont obtenus pour la modélisation au complet et sont très peu discrétilisés. Ce type de modélisation ne permet donc pas de dresser un inventaire à haute résolution temporelle et spatiale.

À l'échelle de simulation choisie, il faut aussi décider de la méthode d'affectation des chemins. La plupart du temps, à partir de la demande de déplacements, la méthode d'affectation des chemins a pour but de répartir la demande sur le réseau tel que le temps de trajet des utilisateurs soit le plus court possible. Les modèles d'affectation de chemins suivent souvent le premier principe de Wardrop faisant l'hypothèse que tous les conducteurs sont homogènes, rationnels, et qu'ils ont des informations parfaites sur les conditions de circulation (Ashfaq, Gu, Waller, & Saberi, 2021). Il est difficile d'affecter les chemins à partir des matrices O/D étant donné le nombre de facteurs à prendre en compte et l'hétérogénéité des conducteurs. Il est aussi nécessaire d'adapter le choix de route aux éléments perturbateurs de la circulation (accident, fermeture de route...) (Ashfaq et al., 2021). Pour cela, les logiciels de simulation de trafic créent des plans d'affectation des chemins à partir de l'application des méthodes d'affectation des chemins indépendantes de l'échelle de modélisation. Un plan d'affectation des chemins est, pour la totalité des véhicules circulant dans la modélisation, la suite des sections par lesquelles passe chacun des véhicules pour se rendre de son origine à sa destination. Le but de la méthode d'affectation des chemins est de définir le plan d'affectation des chemins le plus optimal pour les véhicules de la simulation. Une variété de méthodes d'affectation des chemins existe, mais nous allons nous intéresser ici seulement à la méthode *Dynamic User Equilibrium* (DUE) et *Stochastic Route Choice* (SRC) puisque ce sont les deux disponibles dans le logiciel

de modélisation de trafic AIMSUN utilisé par la ville de Montréal. Pour les deux méthodes d'affectation des chemins suivantes, il y a un plan d'affectation des chemins initial en entrée qui est raffiné par la simulation. Ce plan initial est soit calculé par l'algorithme comme étant, sans tenir compte des autres utilisateurs, le chemin le plus direct pour les véhicules afin de se rendre à leur destination, soit un plan d'affectation des chemins défini par l'utilisateur.

La première méthode d'affectation des chemins d'AIMSUN est la méthode de *Dynamic User Equilibrium* (DUE). Il est plutôt conseillé d'utiliser la méthode DUE pour une modélisation à grande échelle, car cela permettrait de créer moins de congestion sur le réseau (Ashfaq et al., 2021). D'après la définition de Ran & Boyce de 1996, c'est une méthode itérative dont le but est d'obtenir, pour chaque pas de temps et chaque matrice O/D, un temps de trajet minimal et égal pour chaque véhicule partant au même instant (AIMSUN, 2021). L'équilibre trouvé permet de simuler le réseau à l'état habituel où les conducteurs connaissent leur trajet et ne l'adaptent pas à la circulation en temps réel (AIMSUN, 2021). Le modèle utilise un indice de qualité du résultat d'équilibre « *Gap* » (5 % - 10 %) qui modélise la différence entre le coût total des trajets (souvent proportionnel au temps de trajet) des véhicules par rapport au coût total du trajet le plus court utilisé par les véhicules (Ashfaq et al., 2021). Cet indice permet de définir à partir de quelle précision, quel « *Gap* », on considère que la modélisation a atteint son équilibre. La méthode DUE nécessite beaucoup de temps et de moyens de calcul, surtout pour de grands réseaux routiers, mais elle produit des résultats plus robustes et moins congestionnés (Ashfaq et al., 2021).

La seconde méthode d'affectation des chemins étudiée ici est celle de *Stochastic Route Choice* (SRC). C'est une simulation sans itération, qui permet de mieux intégrer les différentes manières de choisir une route par les conducteurs (Ashfaq et al., 2021). La méthode SRC est plutôt utilisée dans des modélisations de segments de route uniquement ou des petits réseaux routiers. Le modèle construit et met à jour, à un certain intervalle (*Route Choice interval*), des arbres de coûts de trajets pour se rendre à chaque centroïde (point d'origine ou de destination d'un réseau de transport utilisant des matrices O/D) de sortie à partir des routes du réseau. Le but est alors de minimiser le coût des trajets de chaque usager (AIMSUN Next Users Manual, s. d. a). Les véhicules sont ensuite répartis sur l'ensemble du réseau à partir des données de ces arbres grâce à un algorithme utilisant une fonction de choix discret (Binomiale,

proportionnelle, Logit, ou C-Logit) comme si les conducteurs avaient connaissance du trafic à l'avance et en temps réel (AIMSUN, 2021). Cette méthode est souvent plus rapide que celle DUE, elle demande moins de puissance informatique c'est pourquoi elle est de plus en plus utilisée. Elle est choisie pour des cas où l'on souhaite voir l'influence d'un événement sur le trafic afin de prévoir la réaction des conducteurs, mais elle ne permet pas de représenter les habitudes des conducteurs puisqu'ils réagissent au trafic actuel et non en mémoire du trafic précédent en situation équivalente (par exemple, le même jour la semaine précédente). Elle introduit aussi un effet aléatoire dans les trajectoires des véhicules et donc, potentiellement, plus de congestion qu'avec la méthode DUE.

1.3.1.3 AIMSUN

À partir des données de l'enquête O/D, la ville de Montréal crée une modélisation de la circulation sur le logiciel AIMSUN signifiant *Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and non-urban Networks*. La dernière version utilisée ici est AIMSUN.next version 20.0.3.

C'est un progiciel de modélisation de trafic développé originellement par le *Transport Simulation Systems* de Barcelone en Espagne (Olstam et Tapani, 2004) à partir des travaux du Professeur Jaume Barceló de l'*Universitat Politècnica de Catalunya* (Barceló et al., 2010). Depuis 2018, AIMSUN fait partie du Yunex Traffic Group de Siemens Mobility. Il est le seul logiciel permettant à la fois la modélisation à l'échelle macro, méso et micro ainsi que des modélisations hybrides à partir des mêmes configurations de routes (Saunier, 2016).

L'interface d'AIMSUN permet de faire la modélisation du réseau routier, de créer des matrices origine/destination, puis de simuler le trafic de manière statique à l'échelle macro, ou de manière dynamique à l'échelle méso, micro ou hybride. Il est ensuite possible d'en extraire les données de trafic correspondantes (AIMSUN Next Users Manual, s. d. d). AIMSUN permet de faire des simulations de trafic sur des modèles de routes combinés, c'est-à-dire en milieu urbain et/ou voies rapides (Algers et al., 1997). Les demandes de trafic peuvent être créées soit

par des matrices origine/destination entre des centroïdes, soit par des flux sur des segments et des proportions de véhicules tournant aux intersections (Swidan, 2011). Lors des simulations, il est possible de créer des événements comme de faire apparaître des messages qui affectent la circulation ou même des incidents sur la route (fermeture d'une route ou d'une voie, modification de la signalisation) sur une période donnée de la simulation (Swidan, 2011).

Lors des simulations, l'ensemble des données sont stockées dans une base de données avec un format au choix, qui peut être exploitée ensuite à l'aide de la page *Output Database Definition* du *User Manual AIMSUN Next*. Dans cette base de données, il existe, notamment, une table, la table MIVEHSECTTRAJECTORY en micro et MEVEHSECTTRAJECTORY en méso, permettant d'avoir les informations de chacun des véhicules pour toutes les sections qu'ils traversent, incluant leur temps de passage. À l'échelle micro uniquement cette fois, il est possible d'avoir accès aux profils de vitesse de chacun des véhicules à chaque pas de la simulation grâce à la table MIVEHDETAILEDTRAJECTORY (AIMSUN Next Users Manual, s. d. d). À partir de l'interface AIMSUN, il est aussi possible d'extraire des données du réseau routier tel que la longueur de chacune des sections par exemple.

On utilise ici ce logiciel puisque c'est celui choisi par le SUM de la ville de Montréal. Ils justifient ce choix de logiciel de modélisation de trafic par le fait qu'il permet de modéliser un grand réseau routier et qu'il donne la possibilité d'affiner progressivement l'échelle de modélisation (macro, puis méso et enfin micro) à partir du même réseau sans avoir à changer de logiciel.

Comparativement à d'autres logiciels de modélisation de trafic, AIMSUN a certains avantages. Tout d'abord, les méthodes de calcul de déplacement des véhicules à l'échelle micro (modèles de poursuite et de changement de voie) sont considérées comme les éléments les plus critiques de la précision des logiciels de modélisation de trafic (Panwai and Dia, 2005). Ceux d'AIMSUN, provenant du modèle de Gipps (Gipps, 1981), se sont avérés être les plus performants d'entre eux (Panwai and Dia, 2005). De plus, pour la calibration des modélisations, il faut moins de paramètres que dans d'autres logiciels afin d'avoir des résultats

de précision équivalente rendant cette étape plus rapide et plus simple à reproduire pour des mises à jour (Anya, Roushail, Frey, & Schroeder, 2014; Olstam et Tapani, 2004). Finalement, il y a aussi la possibilité de visualiser le trafic en direct avec les modélisations à l'échelle micro, ce qui permet de voir rapidement les potentiels problèmes dans la définition du modèle et ainsi aider à la calibration.

1.3.1.4 Autres modèles

D'autres modèles et logiciels de modélisation de trafic ayant des propriétés différentes existent. Parmi les plus utilisés se trouve notamment PARAMICS et VISSIM qui sont relativement équivalents à AIMSUN avec certaines différences.

VISSIM (Fellendorf & Vortisch, 2010):

VISSIM a été développé par Planung Transport Verkehr AG à Karlsruhe en Allemagne en 1994. Il est l'un des logiciels de simulation de trafic les plus utilisés dans le monde pour effectuer des simulations ou des vérifications de nouvelles réglementations de transport. C'est un simulateur multimodal dans lequel on peut modéliser tous types de véhicules : de la voiture individuelle au bus, du camion au véhicule léger ou lourd sur rail, ainsi que des vélos et des piétons. La modélisation se passe en deux étapes : tout d'abord la création du réseau de transport avec tous ses aspects techniques, puis la création de demandes de déplacement pour les personnes voyageant sur ce réseau.

VISSIM permet de faire des modélisations à l'échelle microscopique basées sur les comportements des conducteurs (*drivers' behaviour*) à partir des modèles de poursuite, de changement de voie et d'acceptation de créneau. Le modèle de poursuite de VISSIM est celui de Michaelis (1963) qui est un modèle de poursuite dit psychophysique (*psycho-physical car following model*). Il suggère que les conducteurs identifient la vitesse des véhicules les précédant grâce à leur perception de la variation de taille des véhicules et donc de leur différence de vitesse. Ce modèle permet de mieux représenter les « *drivers behaviour* » et de

modéliser des problèmes complexes de trafic comme les transports intelligents ou les ondes de choc et les effets des incidents, mais il demande aussi plus de paramètres que d'autres modèles. L'autre particularité de VISSIM est que son interface est développée en Programmation Orientée Objet (POO), permettant aux utilisateurs de faire des ajouts aux programmes en C++, Visual Basic ou en Python. La POO leur offre la possibilité de pouvoir ajouter des contrôles et des programmes aux véhicules ou au réseau de transport afin de les personnaliser et afin qu'ils représentent au mieux la réalité (Saidallah, El Fergougui, & Elalaoui, 2016).

PARAMICS (Sykes, 2010) :

Le logiciel PARAMICS (*Parallel Microscopic Simulation of road*) a été développé par l'entreprise écossaise de consulting en gestion du transport SIAS et est disponible à la vente depuis 2000. Il permet de modéliser, sur un réseau de transport sans limite de taille, à la fois des véhicules individuels, ainsi que du transport en commun (bus et tram) et des piétons. Il est utilisé à travers le monde pour faire l'étude de réseaux routiers urbains ou ruraux ainsi que de structures routières comme des ponts, des tunnels ou des stationnements par exemple.

PARAMICS permet de faire des simulations à l'échelle micro d'un réseau de la taille d'une seule intersection de routes à une ville complète en DTA ou STA. La création de ces simulations se fait en deux étapes. Tout d'abord, la conception ou la reproduction du réseau routier, puis la définition des matrices origine/destination entre les différentes zones définies dans le réseau. Contrairement à d'autres logiciels, il n'est pas possible d'entrer la demande de trafic à travers des flux de véhicules sur des segments de route.

Dans la littérature, il existe plusieurs comparaisons entre ces trois logiciels de modélisation de trafic comme celles de Saidallah et al. (2016) ou de Ghariani, Elkossantini, Darmoul, & Ben Said (2014). Contrairement à d'autres, les trois logiciels AIMSUN, PARAMICS et VISSIM offrent la possibilité d'importer des images aériennes d'une zone afin de modéliser son réseau de transport plus facilement et rapidement (Ghariani et al., 2014). Les trois logiciels permettent aussi de faire des animations et d'enregistrer des vues 2D et 3D, seulement, celles d'AIMSUN et de VISSIM sont graphiquement meilleures que celles de PARAMICS (Ghariani et al., 2014).

Cela provient, entre autres, du fait que la simulation du trafic est continue dans AIMSUN et VISSIM alors qu'elle est discrète dans PARAMICS (Saidallah et al., 2016). Le logiciel VISSIM est le seul à offrir la possibilité de changer les modèles de poursuite et de changement de voie (Ghariani et al., 2014). De plus, c'est le logiciel qui modélise les transports en commun et les piétons de la manière la plus détaillée. Contrairement à VISSIM, les logiciels AIMSUN et PARAMICS permettent de calculer les émissions de GES du trafic à partir de modèles d'estimation implantés dans le logiciel. Finalement, AIMSUN est le seul de ces trois logiciels à faire aussi des simulations à l'échelle micro, méso et macro qui sont, en plus, basées sur la même modélisation du réseau et de la demande de trafic.

1.3.2 Modélisation des émissions

À partir des données de trafics modélisées, l'étape suivante est d'estimer les émissions de GES de ce trafic. Plusieurs méthodes existent dans différents logiciels et à différentes échelles. Ici on s'intéresse uniquement aux méthodes implantées dans le logiciel AIMSUN déjà utilisé pour la modélisation de la circulation. L'autre logiciel étudié est celui créé par l'*Environmental Protection Agency* des Etats-Unis (USEPA) MOVES qui est le logiciel le plus répandu en Amérique du Nord pour le calcul d'émissions de GES du transport. Tout comme pour la modélisation de trafic, il existe différentes échelles de calcul d'émissions de GES regroupées, la plupart du temps, en deux catégories : l'échelle microscopique et l'échelle macroscopique (Nocera, Basso, & Cavallaro, 2017). L'échelle la plus fine est l'échelle micro qui permet d'estimer les émissions instantanées de GES à partir des paramètres dynamiques des véhicules (entre autres, leur profil de vitesse instantanée). Elle permet d'avoir une résolution très fine (de l'ordre de la seconde par exemple), mais elle nécessite un plus grand nombre de données à l'entrée et un temps de calcul plus long. Lorsque l'échelle micro d'estimation d'émissions est utilisée avec une modélisation de trafic, cette dernière est nécessairement faite à l'échelle micro. L'autre échelle plus large est l'échelle macro. Elle regroupe les estimations d'émissions s'appuyant sur des paramètres de simulation agrégés tels que la vitesse moyenne des véhicules ou des cycles de conduite par exemple. Cette échelle est surtout utilisée pour des modélisations de territoire de grande dimension, car elle permet d'avoir des résultats moins détaillés, mais

nécessite aussi moins de données et de temps de calcul que l'échelle micro. En outre, elle peut être utilisée avec une modélisation de trafic macro, mais aussi méso. En effet, les estimations d'émissions peuvent être faites par segments de route en utilisant les vitesses moyennes des véhicules sur ceux-ci. Par la suite, lorsque l'on parlera d'estimations d'émissions à partir de vitesses moyennes sur des segments de route, elles seront qualifiées d'échelle méso de modélisation d'émissions.

1.3.2.1 AIMSUN

Dans le logiciel AIMSUN, quatre modèles environnementaux sont implantés dont trois pour les estimations d'émissions de GES et un pour le calcul de la consommation de carburant. Parmi les quatre modèles environnementaux, deux modèles d'estimation de GES ainsi que le modèle de consommation de carburant sont faits à l'échelle micro. Le dernier modèle d'estimation d'émissions de GES d'AIMSUN est à l'échelle méso (AIMSUN Next Users Manual, s. d. c). La documentation sur la méthodologie de calcul de ces modèles est inégale, ce qui rend leur utilisation plus ou moins pratique.

Modèle de Panis et al., 2006

Ce modèle d'échelle micro calcule des émissions de GES instantanées des véhicules en se basant sur leur vitesse, leur accélération ou leur décélération. Le modèle s'adapte à n'importe quelle modélisation de trafic permettant d'avoir accès aux données de vitesse et d'accélération instantanées des véhicules. Les émissions sont calculées à chaque instant au cours de la simulation et non à la fin de celle-ci (Panis, Broekx, & Liu, 2006).

Pour estimer les émissions de CO₂, ils considèrent que la combustion de 0,41 L de carburant correspond à 1 kg de CO₂. Ils différencient un peu la valeur d'émission du diesel et de l'essence. Le modèle d'émission général pour tous les polluants est celui décrit en équation (1.3).

$$E_n(t) = \max[E_0, f_1 + f_2 \cdot v_n(t) + f_3 \cdot v_n(t)^2 + f_4 \cdot a_n(t) + f_5 \cdot a_n(t)^2 + f_6 \cdot v_n(t) \cdot a_n(t)] \quad (1.3)$$

Avec $E_n(t)$ et E_0 en g/s du GES considéré, $v_n(t)$ et $a_n(t)$ la vitesse (en m/s) et l'accélération (en m/s²) respective du véhicule n à l'instant t . Les valeurs de f_1 à f_6 sont spécifiques à chaque type et classe de véhicule et ont été obtenues par une technique de régression non linéaire multiple sur des mesures d'émissions en situation réelle. Le tableau 1 de l'article (Panis et al., 2006) donne le nombre de mesures utilisées pour faire ces régressions par type de véhicule. Les valeurs retenues de f_1 à f_6 sont présentées dans le tableau 2 de l'article (Panis et al., 2006). Ces tableaux sont rappelés en ANNEXE I, respectivement Tableau A I-1 et Tableau A I-2.

Les résultats d'estimation d'émissions obtenus sont comparés avec ceux d'autres modèles de simulation : COPERT III, MEET et HBEFA. La comparaison révèle que le modèle de Panis estime plus d'émissions de GES (dont CO₂) que les autres modèles. La seule exception est pour les oxydes d'azote (NOx) où il est équivalent aux résultats de MEET, mais toujours supérieur à ceux de COPERT III et HBEFA (Panis et al., 2006).

Pour l'implantation du modèle dans un logiciel de modélisation de trafic, quatre modes de conduites sont définis : la vitesse constante ($a_n(t)$ considéré à 0 m/s²), l'arrêt ($v_n(t)$ et $a_n(t)$ à 0 m/s et m/s²), l'accélération (si $a_n(t) > 0,5$ m/s²) et la décélération (si $a_n(t) < -0,5$ m/s²). C'est la méthode utilisée pour l'implantation dans le logiciel AIMSUN entre autres.

Dans AIMSUN, en sortie, les données d'émissions du modèle de Panis, calculées pour chaque pas de temps, sont accompagnées de la localisation, et des vitesse et accélération instantanées du véhicule (AIMSUN Next Users Manual, s. d. d).

Dans l'article de Panis et al., il est précisé que la calibration et la validation des modèles de trafic et d'émissions sont essentielles à l'utilisation de la méthode développée. Cette calibration se fait en deux étapes. Premièrement, les deux modèles doivent être calibrés indépendamment l'un de l'autre, c'est ce qui a été fait dans l'étude décrite dans l'article. En effet, le modèle d'émissions est basé sur une expérience indépendante du modèle de trafic. La calibration du modèle de trafic est basée sur des relevés de vitesses moyennes et de comptages des véhicules. Par la suite, il faudrait calibrer l'ensemble des deux avec une observation dynamique du trafic

et des émissions de polluants, ce qui n'a pas été réalisé ici, mais serait nécessaire à la validation du modèle proposé (Panis et al., 2006; Olstam et Tapani, 2004).

De plus, d'après une réponse du *AIMSUN Support Desk* (M. Castro, communication personnelle, 10 décembre 2021), le modèle de Panis de 2006 est le plus récent proposé dans AIMSUN, mais il est difficile à adapter à un modèle de trafic puisque ses paramètres (f_1 à f_6) sont donnés par défaut pour le cas spécifique de leur expérience et sont relativement abstraits. Il a donc été montré que les résultats sont habituellement surestimés à cause de l'amélioration de la consommation de carburant des véhicules depuis l'étude.

QUARTET, 1992

Ce modèle d'estimation d'émissions de GES est à l'échelle microscopique. Développé en 1992, il est toujours utilisable, car il ne repose pas sur des paramètres d'émissions prédéfinis. C'est l'utilisateur qui choisit à la fois le GES calculé ainsi que les facteurs d'émissions correspondants au GES.

Quatre états de fonctionnement sont définis : l'arrêt, l'accélération, la décélération, et la vitesse constante. L'utilisateur associe un facteur d'émission à chacun de ces états sauf pour la vitesse constante où il peut rentrer des facteurs d'émissions (en g/s) pour des vitesses (km/h) spécifiques. On peut définir jusqu'à 15 points sur la courbe d'émission en fonction de la vitesse et AIMSUN les relie ensuite de manière linéaire. Il est aussi possible d'ajouter un coefficient d'impact supplémentaire lié à la pente (%) des routes empruntées et à la vitesse du véhicule y circulant.

À chaque étape de la simulation, AIMSUN associe chaque véhicule à un état de fonctionnement puis multiplie la durée d'un pas de simulation par le facteur d'émission correspondant. Les résultats permettent d'obtenir les émissions à chaque instant pour chaque segment de route et de faire leur total. Seulement, contrairement aux autres modèles micro, seuls les véhicules ayant quitté le segment de route avant la fin de la modélisation sont comptabilisés.

London Emission Model (LEM)

Ce modèle d'estimation d'émissions de GES est à l'échelle méso. Le modèle LEM a été développé par *The University of Leeds* à partir du parc de véhicules de Londres et dont les paramètres de calcul ne peuvent être modifiés que par leur soin.

L'estimation des émissions est à l'échelle méso puisqu'elle est basée sur les « *micro-trips* » des véhicules : la vitesse moyenne d'un véhicule est utilisée entre le moment où celui-ci dépasse les 5 km/h jusqu'au moment où il repasse en dessous. Ensuite, une valeur d'émission (nommée y dans les équations (1.4) et (1.5), en g/km) est attribuée selon la vitesse moyenne du véhicule sur le « *micro-trip* » (nommée x dans les équations (1.4) et (1.5), en km/h).

$$\text{Si } x < 10 \text{ km/h,} \quad y = a \cdot x^z + b \quad (1.4)$$

$$\text{Si } x \geq 10 \text{ km/h,} \quad y = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + x + c \quad (1.5)$$

Avec a , b et c des constantes définies pour chaque norme euro de chaque type de véhicule. Les normes euro sont des normes mises en place par l'Union Européenne afin de limiter les émissions de polluants des véhicules du marché. Ces normes sont de plus en plus contraignantes au fur et à mesure des années (Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires & Ministère de la Transition énergétique, 2017). La méthode d'obtention de ces constantes est décrite dans le manuel utilisateur d'AIMSUN (AIMSUN Next Users Manual, s. d. c).

Les valeurs d'émissions finales sont obtenues en sommant les émissions de chaque véhicule de chaque section multipliées par la longueur de chaque section, excepté lorsque les véhicules tournent à une intersection de la simulation (AIMSUN Next Users Manual, s. d. c).

Consommation de carburant

Ce modèle environnemental d'AIMSUN est calculé à l'échelle microscopique. Il estime la consommation de carburant des véhicules en fonction de leur état de fonctionnement : à l'arrêt, à vitesse constante, en accélération ou en décélération (AIMSUN Next Users Manual, s. d. c). Lors du paramétrage de ce modèle, il y a sept constantes intrinsèques du véhicule (F_i , F_d , c_1 &

c_2 , v_m , et F_1 & F_2) à rentrer en paramètre des catégories de véhicules sur AIMSUN. Les valeurs de ces constantes sont utilisées dans les équations (1.6) à (1.9) de calcul de consommation de carburant aux différents états de fonctionnement.

À l'arrêt et en décélération :

La consommation est considérée constante à la valeur F_i à l'arrêt et F_d en décélération.

À l'accélération :

$$F_a = (c_1 + c_2 \cdot a \cdot v) \quad (1.6)$$

Avec F_a en ml/s, c_1 et c_2 des constantes rentrées pour chaque catégorie de véhicule, a et v sont l'accélération et la vitesse instantanée du véhicule.

À vitesse constante :

$$F_c = k_1 \left(1 + \left(\frac{v}{2 \cdot v_m} \right)^3 \right) + k_2 \cdot v \quad (1.7)$$

Avec F_c en ml/s, v_m la vitesse à laquelle le véhicule consomme le moins à vitesse constante (souvent autour de 50 km/h), et v la vitesse du véhicule. k_1 et k_2 sont des valeurs déterminées par les équations (1.8) et (1.9).

$$k_1 = \frac{(F_1 - F_2)v_1 \cdot v_2 \cdot v_m^3}{180(2 \cdot v_2 \cdot v_m^3 - 2 \cdot v_1 \cdot v_m^3 + v_2 \cdot v_1^3 - v_1 \cdot v_2^3)} \quad (1.8)$$

$$k_2 = \frac{2 \cdot F_2 \cdot v_2 \cdot v_m^3 - 2 \cdot F_1 \cdot v_1 \cdot v_m^3 + F_2 \cdot v_2 \cdot v_1^3 - F_1 \cdot v_1 \cdot v_2^3}{360(2 \cdot v_2 \cdot v_m^3 - 2 \cdot v_1 \cdot v_m^3 + v_2 \cdot v_1^3 - v_1 \cdot v_2^3)} \quad (1.9)$$

Avec F_1 et F_2 les consommations de carburant en L pour un véhicule roulant, sur 100 km/h, respectivement à la vitesse $v_1 = 90 \text{ km/h}$ ou $v_2 = 120 \text{ km/h}$.

1.3.2.2 MOVES

Le logiciel *MOtor Vehicle Emission Simulator* (MOVES) est un « *modal-based emissions model* ». Il a été créé par l'USEPA, à la base pour les inventaires nationaux d'émissions de GES, mais a aussi des échelles de simulation méso et micro. En 2010, il vient remplacer l'ancien logiciel de l'USEPA MOBILE6 afin de l'améliorer en permettant de faire de meilleures estimations à de plus petites échelles (Guo et al, 2013). La version utilisée ici est MOVES3.0.1 qui est couplée avec un logiciel de requête SQL (*Structured Query Language*) pour le traitement des données en sortie.

MOVES utilise une approche ascendante qui modélise toutes les émissions polluantes du transport routier, de la voiture et du camion aux bulldozers, grâce à une méthode de catégorisation (« *binning methodology* »), plutôt que de manière instantanée pour chaque véhicule (USEPA, 2021a). Cette méthode regroupe les véhicules par *Vehicle Specific Power* (VSP) (puissance instantanée du véhicule divisée par sa masse, en kW/t) et par vitesse de déplacement en faisant l'hypothèse que les émissions sont les mêmes pour les véhicules de même type, de même carburant et de même âge. Les véhicules sont donc répartis dans 23 catégories d'émissions (Liu et Frey, 2012) auxquelles sont associées des facteurs d'émissions moyens. Ces données d'émissions moyennes sont obtenues à partir de tests en laboratoires et en conditions réelles de circulation. Les émissions sont donc calculées en multipliant les facteurs d'émissions moyens par le temps que passe le véhicule dans la catégorie d'émission ou de VSP correspondante. Elles sont ensuite sommées sur toute la simulation et pour tous les véhicules. MOVES permet donc de modéliser les émissions d'une grande variété de polluants et d'en dresser un inventaire heure par heure par type de véhicule et par phénomène à l'origine des émissions.

Il est possible d'utiliser MOVES afin de représenter les cycles de conduite des véhicules. Les cycles de conduites rendent compte des habitudes et attitudes des conducteurs au travers de la variation de leur vitesse au cours des simulations. Ces cycles de conduites sont souvent différents selon les zones géographiques. Dans l'étude de Nouri (2016), il a été démontré qu'il était possible de créer des cycles de conduites adaptés à Montréal grâce à MOVES et que ceci avait un fort impact sur les émissions de GES.

MOVES permet donc d'avoir des résultats relativement précis en prenant en compte différents phénomènes d'émissions de GES et de particules fines, mais il implique aussi une grande complexité de calcul et demande des données spécifiques à chaque véhicule (Nocera et al., 2017), à leurs trajets et à leur environnement de circulation, ce qui le rend plus difficile à coupler avec un logiciel de DTA (Wang, Szeto, Han, & Friesz, 2018).

Il existe des comparaisons de MOVES avec d'autres logiciels de modélisation des émissions. Entre autres, dans l'étude de Wyatt (2017), il est effectué une comparaison de MOVES avec d'autres logiciels de modélisation d'émissions de GES : PHEM, HBEFA et EFT. Il y compare les résultats des logiciels avec des mesures en conditions réelles de circulation obtenues avec *Portable emissions measurement systems* (PEMS) permettant d'enregistrer des émissions et des données de véhicules, seconde par seconde, dans des conditions réelles de simulation. Plusieurs tests sont effectués en changeant les conditions de simulation, par exemple, avec ou sans considération de la pente des routes. Il est démontré que MOVES et PHEM sont les deux meilleures estimations. La seule légère différence est que MOVES apparaît comme plus précis, c'est-à-dire que ses résultats d'inventaires sont plus proches des émissions obtenues par PEMS, alors que PHEM est lui plus fidèle, c'est-à-dire que ses résultats d'inventaires sont, pour chacune des conditions de simulation et des différentes sections, plus similaires entre eux. Seulement, il conclut aussi que les deux logiciels sous-estiment légèrement les émissions par rapport aux mesures PEMS.

1.3.3 Calibration des modélisations

Que ce soit la modélisation de trafic ou celle des émissions de GES, la littérature démontre que toutes deux nécessitent une calibration des données d'entrée ainsi qu'une validation des données de sortie (Hollander et Liu, 2008). Pour une modélisation de trafic avec un logiciel tel qu'AIMSUN, il est nécessaire de calibrer les paramètres des véhicules, c'est-à-dire des modèles de trajectoire du logiciel (agressivité, temps de réaction en autres), ainsi que les données de circulation (comptage, durée du trajet, nombre d'arrêt par exemple). Pour un modèle d'émissions tel que MOVES par exemple, la calibration passe par les facteurs d'émissions et les résultats d'inventaire.

Peu importe l'échelle de modélisation, la calibration des modélisations de circulation et d'émissions est nécessaire (Ashfaq et al., 2021; Madi, 2016). Les émissions de GES étant fortement liées à l'agressivité des conducteurs, il est d'autant plus nécessaire de bien calibrer

le modèle micro de trafic afin que les trajectoires des véhicules soient les plus représentatives possibles de la réalité (Olstam et Tapani, 2004; Madi 2016). Dans l'étude d'Anya et al. (2014), les auteurs effectuent une comparaison entre les résultats de calculs d'émissions avec AIMSUN, calibrés ou non, et des données réelles relevées par un système PEMS. Finalement, la différence calculée est de 16 % entre les émissions de CO₂ calculées à partir de la simulation AIMSUN avec des paramètres par défaut et les données empiriques obtenues avec PEMS. Une analyse de sensibilité de la calibration est ensuite conduite en comparant les résultats d'AIMSUN non calibré avec trois autres modélisations plus ou moins calibrées : une avec la calibration du temps de trajet des véhicules, une avec la calibration du nombre d'arrêts des véhicules, et une dernière avec ces deux calibrations. Il se trouve que, pour le CO₂, mais pas forcément pour les autres GES, c'est la calibration du temps de trajet qui augmente le plus la précision des résultats d'inventaire (7 % de différence avec les résultats PEMS). La modélisation avec la calibration à la fois des temps de trajets et du nombre d'arrêts est celle ayant les résultats les plus proches de ceux PEMS avec seulement 4 % de différence (Anya et al., 2014).

Il existe différentes méthodes de calibration et de validation des paramètres (la comparaison en paire ou multiple, l'analyse sur des séries de temps entre autres) dont le choix dépend des variables analysées, du système de transport et du modèle de données (Barceló, 2010). Il est aussi recommandé de faire des analyses de sensibilité afin de voir quels paramètres ont le plus d'importance et d'impact sur les résultats (Antoniou et al., 2014). Pour le cas d'AIMSUN, pour calibrer les paramètres des véhicules, les caractéristiques les plus importantes sont celles ayant un impact sur les modèles de poursuite et de changement de voie (Anya et al., 2014). Leurs paramètres principaux sont le « *Maximum desired speed* », « *Maximum desired acceleration* », et « *Normal deceleration* » qui peuvent être calibrés à partir de données PEMS par exemple (Anya et al., 2014. Madi, 2016). Pour calibrer les données de circulation, la méthodologie de Dowling, Skabardonis, Halkias, McHale, & Zammit (2004) suggère d'utiliser des détecteurs afin de mesuré les flux de véhicules à différents endroits de la simulation et les comparer aux comptages réels. Pour MOVES, les paramètres de la base de données interne sont calibrés avec

les conditions de circulation et des véhicules des Etats-Unis et la dernière mise à jour date de 2017 (USEPA, 2021b).

La dernière étape est la validation des données. Une fois la simulation calibrée, il est suggéré de venir comparer ses résultats avec un jeu de données différent de celui utilisé pour la calibration (Hollander et Liu, 2008; Madi, 2016). Cette dernière vérification a pour but de confirmer la calibration effectuée. Différentes techniques de validation existent telles que des méthodes plus quantitatives en analysant la valeur de certains paramètres de simulation. En outre, cela peut aussi se faire par contrôle visuel de la simulation avec des graphiques ou des animations de simulation afin de vérifier qu'il n'y a pas de comportement illogique.

Comme expliqué à la section 1.3.1.2, afin d'estimer les émissions à partir d'une simulation de trafic, il est fortement recommandé d'utiliser l'échelle micro pour avoir des résultats précis. Cependant, cette précision dépend de la calibration des paramètres dynamiques des véhicules et de leur validation (Panis et al., 2006; Madi, 2016). La calibration d'un modèle micro est considérablement plus difficile et longue que celle d'un modèle macro, mais elle est nécessaire afin de représenter au mieux les habitudes de conduite et d'en déduire les émissions (Olstam et Tapani, 2004). Dans une étude, deux modèles de poursuite différents, Gipps 1981 et Newell 2002, sont comparés entre eux pour voir l'influence de la calibration sur les résultats d'inventaires d'émissions de GES (Vieira da Rocha et al., 2015). Il en ressort que, pour les deux modèles, les résultats d'inventaire de GES sont très sensibles à la calibration des modèles. De plus, pour les émissions d'un groupe de véhicules, le modèle de Newell semble être plus précis que celui de Gipps (implanté dans AIMSUN) : l'erreur moyenne pour Gipps est de 10 % alors qu'elle est < 4 % pour Newell (Vieira da Rocha et al., 2015). En outre, dans AIMSUN, malgré la calibration et la validation des paramètres dynamiques des véhicules, leurs trajectoires restent différentes entre la réalité et celles simulées, ce qui crée des incertitudes sur les estimations d'émissions (Madi, 2016). En effet, la calibration réduit les accélérations brusques des véhicules d'AIMSUN, mais pas encore suffisamment par rapport à leurs trajectoires réelles, ce qui engendre des erreurs sur les estimations d'émissions (Madi, 2016).

Il existe, dans la littérature, des recherches récentes sur l'optimisation de cette étape de calibration (Osorio & Punzo, 2019 ; Shafiei, Gu, & Saberi, 2018). Dans celle d'Osorio et Punzo (2019), la méthode basée sur une « *metamodel simulation-based optimization method* » permet de calibrer plus rapidement et efficacement une modélisation à l'échelle micro d'un grand réseau comme une ville par exemple. Celle-ci s'adapte au modèle de poursuite de Gipps qui est celui dans AIMSUN. Dans l'étude de Shafiei et al. (2018), les auteurs utilisent une méthode basée sur le *Machine learning* afin de calibrer une grande modélisation DTA avec AIMSUN dans la ville de Melbourne en Australie. En comparant leurs résultats avec des données empiriques, leur modélisation à l'échelle méso se rapproche plus des données empiriques utilisées pour la validation de la modélisation.

1.4 Bilan du contexte et objectifs du mémoire

Les changements climatiques que nous observons depuis quelques décennies sont causés par les émissions de GES anthropiques et plus particulièrement de CO₂. À tous les niveaux, les gouvernements prennent donc des engagements pour réduire leurs émissions afin de limiter le réchauffement climatique global. Que ce soit à l'échelle du Canada, du Québec ou de la ville de Montréal, le secteur du transport routier est toujours le premier ou le deuxième secteur le plus émetteur de CO₂. Il est donc parmi les secteurs pour lesquels il est nécessaire de légiférer et de réduire les émissions en priorité.

Pour se rendre compte de l'impact des mesures visant à réduire les émissions de GES, il est essentiel d'avoir des outils d'estimation d'émissions les plus précis possibles. C'est dans ce cadre qu'entre en jeu la carte carbone de la Chaire de recherche du Canada sur la mesure de l'impact des activités humaines sur les changements climatiques. Cette carte a pour vocation d'être un outil d'aide à la décision et à la visualisation des émissions de GES, pour les décideurs politiques, ainsi que pour la sensibilisation du grand public. Contrairement aux inventaires faits actuellement, celui-ci aura l'avantage d'avoir une haute résolution spatiale et temporelle permettant d'identifier les sources de GES et de voir l'impact des mesures de réduction. C'est en ce sens qu'a été faite l'étude suivante afin de rechercher une méthode d'estimation et de

modélisation des émissions de CO₂ du transport routier à Montréal, et plus précisément pour l'arrondissement de Saint-Laurent.

L'objectif général de ce mémoire est donc de comparer des modèles d'estimation d'émissions afin de faire des recommandations pour la carte carbone. Cela comprend la nécessité de trouver des sources de données et d'étudier comment les exploiter. L'une d'entre elles est la modélisation de trafic dans le logiciel AIMSUN faite par le SUM qu'il faudra coupler avec les modèles environnementaux d'AIMSUN ou MOVES. L'étude menée ici avec, entre autres, la comparaison des modèles environnementaux d'AIMSUN entre eux ainsi qu'avec le logiciel MOVES n'existe pas dans la littérature à ma connaissance. Des analyses de sensibilité permettront ensuite d'identifier les paramètres ayant le plus d'importance et nécessitant le plus de précision.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

La méthodologie appliquée dans cette étude est résumée avec la Figure 2.1. Les données et bases de données utilisées dans l'étude sont inscrites à droite de leurs étapes d'utilisation respectives.

La première étape est la modélisation de la circulation. Pour cela, le service de l'urbanisme et de la Mobilité de Montréal (SUM) a mis à disposition une modélisation de la circulation dans l'arrondissement de Saint-Laurent faite sur AIMSUN à partir des données de l'enquête origine destination de 2018. La modélisation n'ayant pas été créée pour faire des estimations d'émissions de CO₂, quelques modifications ont dû être effectuées et une nouvelle modélisation AIMSUN a été construite à partir de celle originale du SUM. Une vérification est conduite pour s'assurer que cette nouvelle modélisation représentait aussi fidèlement la circulation dans l'arrondissement.

La deuxième étape est l'estimation des émissions de CO₂ à partir des données de simulation. Pour cela, les modèles environnementaux implantés dans le logiciel AIMSUN ainsi que le logiciel MOVES ont été utilisés. Leurs résultats et méthodologies de paramétrage ont pu être comparés afin d'en identifier les avantages et les inconvénients.

La dernière étape est l'analyse de sensibilité des modèles utilisés. L'analyse de sensibilité des paramètres généraux des véhicules d'AIMSUN a été conduite ainsi que celle des paramètres du modèle de consommation de carburant. L'influence de l'adaptation du paramétrage de MOVES aux conditions de Montréal a été étudiée afin de déterminer l'importance de ces paramètres dans une future utilisation.

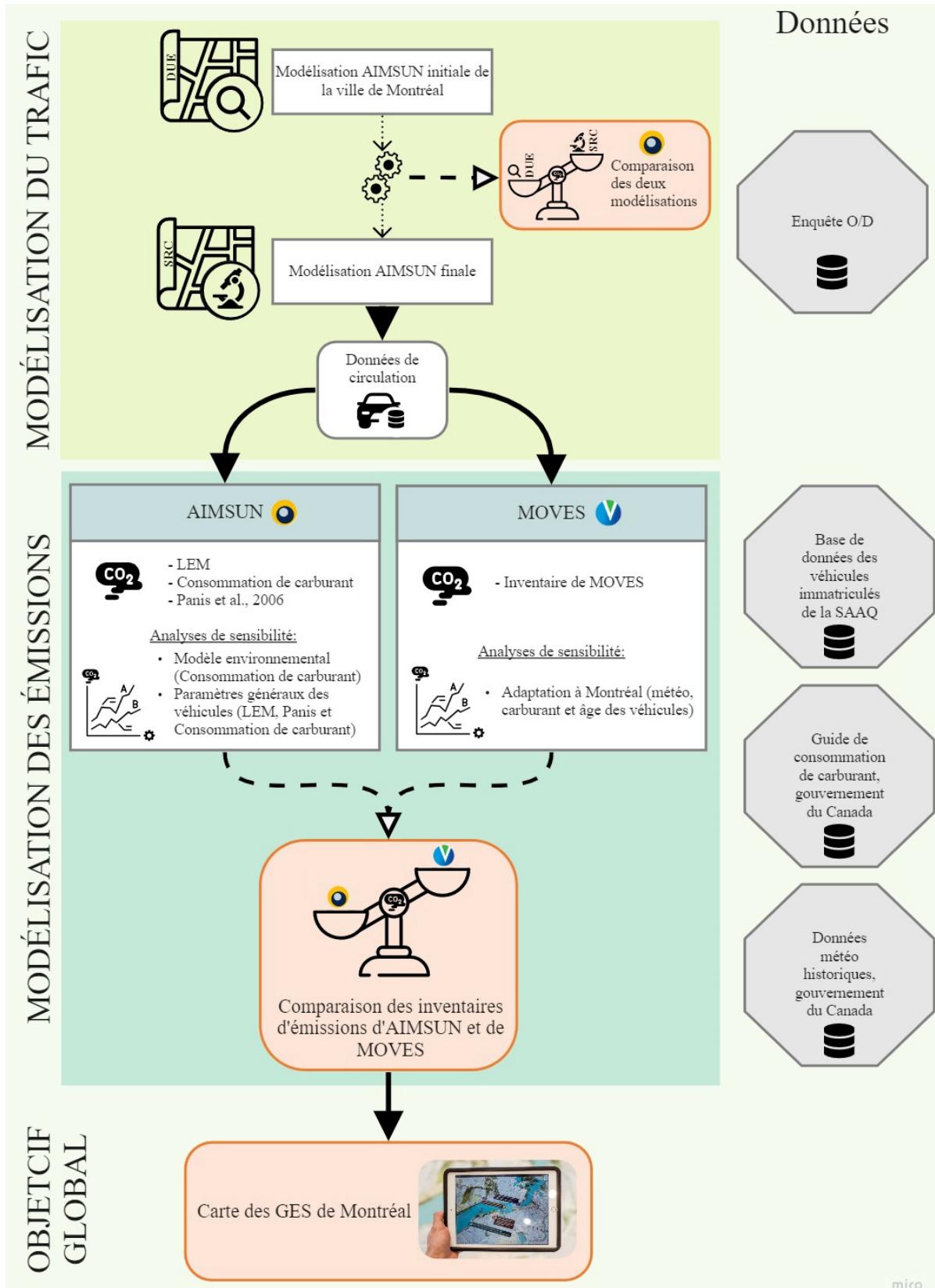


Figure 2.1 Schéma de la méthodologie du mémoire

2.1 Modélisation de la circulation

Cette section décrit la méthodologie d'exploitation de la modélisation AIMSUN de la ville de Montréal qui a été appliquée dans le cadre de ce mémoire. Le but est d'obtenir, en sortie de la modélisation de trafic, des données utilisables par les modèles d'estimation d'émissions d'AIMSUN et par le logiciel MOVES.

2.1.1 Modélisation AIMSUN de la ville de Montréal

Tous les cinq ans, le SUM crée une modélisation de la circulation de la ville de Montréal à partir du travail du Ministère des Transports Québécois (MTQ) et des données de transport en commun. Le MTQ utilise les résultats de l'enquête O/D pour modéliser la demande de déplacements dans la région de Montréal, ici c'est celle de 2018 qui est utilisée. Depuis peu, le SUM réalise cette modélisation sur le logiciel AIMSUN. Une modélisation pour l'heure de pointe du matin et une pour celle de l'après-midi sont créées. Pour la suite de l'étude, uniquement celle du matin est utilisée. La modélisation du SUM représente la ville de Montréal en entière, mais, ici, uniquement sur l'arrondissement de Saint-Laurent est étudié. L'arrondissement de Saint-Laurent est partenaire du projet de carte carbone. De plus, il permet d'avoir une modélisation plus petite que celle la ville de Montréal au complet tout en regroupant tous les types de routes et de zones urbaines.

Pour l'heure de pointe du matin, deux modélisations ont été créées : une à l'échelle macro et une à l'échelle méso. L'intérêt est ensuite porté à celle méso qui est calculée avec la méthode d'affectation des trajets DUE. Les modélisations de la ville ont été calibrées à partir de comptages des véhicules à certaines intersections ou certains segments de routes.

Concernant les résultats de cette simulation, celle-ci enregistre l'état des véhicules s'y déplaçant toutes les secondes ainsi que les données de circulation agrégées toutes les 10 minutes par segment de route et par type de véhicule. En tout, le temps de simulation est d'une heure, de 7h à 8h du matin.

2.1.2 Constraintes et modifications de la modélisation AIMSUN initiale

AIMSUN a quatre modèles environnementaux intégrés au logiciel qui peuvent être exécutés en même temps que la modélisation de trafic. Comme présenté en 1.3.2.1, seul le modèle de LEM est calculable à l'échelle mésoscopique et microscopique, les trois autres sont uniquement disponibles à l'échelle microscopique. Il est donc nécessaire de créer une modélisation micro à partir de celle méso du SUM afin d'utiliser Panis, QUARTET ou le modèle de consommation de carburant.

De plus, comme expliqué en 1.3.1.2, une simulation DUE requiert une plus grande capacité de calcul qu'une simulation SRC. De la même manière, une simulation micro est plus exigeante qu'une simulation méso. Ainsi, il est difficile de faire tourner une simulation micro DUE sur un ordinateur portable classique. Il a donc été nécessaire de créer, à partir de la modélisation initiale du SUM, une simulation en SRC pour l'échelle micro afin de pouvoir obtenir les résultats de tous les modèles environnementaux d'AIMSUN.

À l'échelle micro et méso, la demande de déplacements et les matrices O/D de la modélisation restent les mêmes. Seulement, comme expliqué en 1.3.1.2, les méthodes d'affectation des chemins DUE et SRC ne reflètent pas les mêmes attitudes de conduite : celle DUE permet d'obtenir un trafic tel qu'il le serait un jour de semaine classique en milieu d'année avec des conducteurs habitués à leurs trajets. En revanche, en SRC, les conducteurs s'adaptent aux conditions de circulation en direct en prenant des décisions comme s'ils les empruntaient pour la première fois. Le trafic en résultant est donc moins représentatif de celui de la plupart des jours de l'année. Dans l'optique de garder autant que possible un trafic similaire à celui obtenu par la modélisation méso DUE calibrée du SUM, le modèle SRC de la modélisation micro prend en entrée le plan d'affectation des chemins de l'itération finale de la modélisation méso DUE. Cela permet aux véhicules d'avoir, par défaut, un trajet de base comme s'il était fait de manière habituelle et optimisée grâce aux résultats du calcul DUE. Avec les affectations recalculées au cours de la simulation micro par la méthode SRC, certains véhicules vont changer de trajectoire, mais la majorité d'entre eux vont garder celle trouvée initialement. Le

paramétrage de la méthode d'affectation des chemins SRC a été fait par un employé du SUM afin que la modélisation micro SRC se rapproche autant que possible de celle méso DUE.

Cependant, cette nouvelle modélisation de la circulation micro SRC n'est pas calibrée ce qui engendre une forte incertitude sur les résultats. Comme l'objectif est de comparer les méthodes de calculs d'émissions de GES entre elles, cette incertitude n'a pas vraiment d'influence sur les conclusions de cette comparaison.

La première étape de la méthodologie de ce mémoire a été de comparer l'impact du changement d'échelle et du changement de méthode d'affectation des chemins, afin de vérifier que la nouvelle modélisation micro SRC, nécessaire à l'utilisation des modèles environnementaux d'AIMSUN, représente toujours un trafic réaliste proche de celui de la modélisation du SUM. Dans cet objectif, les variables comparées sont celles présentées en Tableau 2.1. Leurs valeurs sont comparées pour les trois modélisations AIMSUN différentes en calculant leur pourcentage de différence selon l'équation (2.1) pour la comparaison des modélisations méso SRC et méso DUE, l'équation (2.2) pour la comparaison des modélisations méso SRC et micro SRC, et l'équation (2.3) pour la comparaison des modélisations méso DUE et micro SRC.

$$\text{Pourcentage} = \frac{\text{Valeur méso SRC} - \text{Valeur méso DUE}}{\text{Valeur méso DUE}} \quad (2.1)$$

$$\text{Pourcentage} = \frac{\text{Valeur micro SRC} - \text{Valeur méso SRC}}{\text{Valeur méso SRC}} \quad (2.2)$$

$$\text{Pourcentage} = \frac{\text{Valeur micro SRC} - \text{Valeur méso DUE}}{\text{Valeur méso DUE}} \quad (2.3)$$

Tableau 2.1 Détails des résultats de simulation d'AIMSUN

Émissions de CO ₂	Somme des émissions de CO ₂ des voitures calculées par le modèle LEM à chaque pas de la simulation (en kg).
Émissions de CO ₂ /densité de voitures	Émissions de CO ₂ divisées par la densité moyenne de voitures au cours de la simulation (en kg/véhicules/km).
Émissions de CO ₂ /distance parcourue	Émissions de CO ₂ divisées par la distance totale parcourue par les voitures au cours de la simulation (en kg/km).
Comptage en entrée	Somme du nombre de voitures entrant dans la simulation au cours de chaque période de simulation.
Véhicules à l'intérieur	Somme des comptages de voitures à l'intérieur de la simulation à chaque pas de simulation.
Densité	Moyenne des densités moyennes calculées pour chaque pas de simulation (en véhicules/km).
Distance parcourue	Somme des distances parcourues par les véhicules sortis de la simulation durant chaque période de simulation (en km).
Véhicules attendant dehors	Nombre de véhicules attendant dehors à la fin de la simulation. Ce sont des véhicules créés par la simulation, pour répondre à la demande de trafic renseignée dans les matrices OD, qui n'ont pas pu entrer dans la simulation à cause de la congestion.
Nombre de changements de voie	Somme des nombres de changements de voies totaux effectués durant chaque période de simulation.
Queue moyenne	Moyenne des queues moyennes calculées à la fin de chaque période de simulation (en secondes).

Pour le calcul des émissions de CO₂, le modèle environnemental utilisé est celui de LEM puisqu'il est le seul à être calculé à la fois à l'échelle méso et micro. Son paramétrage est détaillé dans la section suivante 2.2.1.4.

2.2 Modélisation des émissions

Une fois la modélisation de trafic d'AIMSUN finie, on utilise ces données de sortie et ces résultats pour estimer les émissions de GES grâce à des modèles d'estimation d'émissions. Ici, on utilise et on compare les modèles environnementaux directement implantés dans AIMSUN, et le logiciel MOVES de l'USEPA (voir 1.3.2.1 et 1.3.2.2).

2.2.1 Modèles environnementaux d'AIMSUN

À partir de la modélisation micro SRC d'AIMSUN, trois des quatre modèles environnementaux implantés dans AIMSUN sont utilisés : LEM, Panis, et le modèle de consommation de carburant. Ces modèles sont présentés en 1.3.2.1.

Leur paramétrage se fait à partir des catégories de véhicules créés dans la modélisation. Dans la simulation du SUM, seulement trois catégories de véhicules sont en circulation : les voitures, les camions et les bus. Uniquement les voitures sont étudiées dans cette étude puisque les paramétrages des modèles environnementaux sont disponibles pour ce type de véhicules. En effet, au moment de l'étude, pour le model de consommation de carburant d'AIMSUN, le manuel d'utilisation d'AIMSUN ne fournissait des paramétrages que pour les voitures. Les voitures représentent 98 % des véhicules en circulation dans la modélisation. Pour le modèle de QUARTET de 1992, il y a des paramétrages disponibles pour les émissions de monoxyde de carbone (CO), d'oxyde d'azote (NOx) et d'hydrocarbures (HC), mais pas pour le CO₂, c'est pourquoi, il n'est pas étudié par la suite.

L'objectif de cette deuxième partie de la méthodologie est, tout d'abord, de comparer les résultats des trois modèles environnementaux et leurs variations au cours de la simulation de trafic sur AIMSUN.

2.2.1.1 Choix du véhicule type

Pour le paramétrage du modèle de consommation de carburant, il n'y a que trois jeux de valeurs disponibles dans le manuel d'utilisation d'AIMSUN (AIMSUN Next Users Manual, s. d. b) correspondant à trois modèles de véhicules :

- Ford Fiesta;
- Ford Escort;
- Ferrari Testarossa.

Le choix a été fait de paramétriser les modélisations environnementales comme si le parc de voitures était constitué entièrement de Ford Fiesta roulant à l'essence. D'après ce paramétrage, la Ford Fiesta consomme 6,5 L/100 km à 120 km/h (voir section 2.2.1.3).

D'après la base de données de la SAAQ, il y avait 2 141 Ford Fiesta immatriculées à Montréal en 2019, soit le 77^{ème} modèle de véhicules le plus représenté (SAAQ, 2019). Des trois modèles de véhicules disponibles pour le paramétrage du modèle de consommation de carburant dans le manuel d'utilisation d'AIMSUN, c'est celui qui est le plus représenté à Montréal.

Le gouvernement du Canada publie tous les ans un Guide de consommation de carburant pour les véhicules en circulation au Canada. Il donne, entre autres, la consommation des véhicules sur route correspondant à la consommation de carburant en litres par 100 km sur un long trajet typique à la fois sur routes principales et secondaires. D'après celui de 2019 (dernière année où la Ford Fiesta apparaît), la consommation sur route d'une Ford Fiesta à boîte automatique de 6 vitesses est de 6,4 L/100 km (Ressources naturelles Canada, 2019), ce qui est proche du 6,5 L/100 km à 120 km/h du manuel d'utilisation d'AIMSUN.

Finalement, en croisant les données de la SAAQ et celles du Guide de consommation de carburant de 2019, il est possible de calculer la consommation moyenne sur route des voitures de Montréal pondérée par le nombre d'immatriculations de ces modèles de voitures. La valeur obtenue est une consommation d'environ 6,6 L/100 km encore une fois proche de la valeur de consommation de carburant à 120 km/h de la Ford Fiesta du manuel d'utilisation d'AIMSUN.

Finalement, l'hypothèse de modéliser le parc de voitures montréalais avec uniquement des Ford Fiesta semble acceptable malgré la sous-estimation des consommations de carburant engendrée. De plus, comme l'objectif est de comparer les modèles et non d'estimer précisément les émissions, l'incertitude engendrée par cette uniformisation du parc de véhicules en Ford Fiesta n'a pas d'impact important sur les conclusions des comparaisons. Le manuel d'utilisation d'AIMSUN ayant été mis à jour (AIMSUN Next Users Manual, s. d. c), ces données ne sont pas disponibles en ligne, mais l'étaient à partir de la section d'aide du logiciel lorsque que cette étude a été faite.

2.2.1.2 Paramétrage du modèle de Panis et al, 2006

Pour Panis, il n'est pas possible d'avoir un autre paramétrage que celui par défaut basé sur la flotte de voitures à essence de 2010 de la ville de Ghent en Belgique, dont 11,4 % des voitures à essence sont des Ford Fiesta (Panis et al., 2006) (voir ANNEXE I, Tableau A I-1). Cette flotte de véhicules est une projection de celle qui était attendue en 2010 à l'époque (L. Panis, communication personnelle, 30 juin 2022).

Le paramétrage entré pour les voitures est présenté au Tableau 2.2, où les facteurs sont des valeurs par défaut du modèle correspondants aux f_1 à f_6 dans l'équation (1.3) décrite en 1.3.2.1.

Tableau 2.2 Paramétrage du modèle de Panis et al, 2006 d'AIMSUN

Types de Carburant	100 %	Valeurs d'émissions					
		Limite basse	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3	Facteur 4	Facteur 5
Essence	100 %	0,00	0,553	0,161	-0,003	0,266	0,511
Diesel	0 %	0,00	0,324	0,086	0,005	-0,059	0,448
GPL	0 %	0,00	0,600	0,219	-0,008	0,357	0,514
EV	0 %						0,170

2.2.1.3 Paramétrage du modèle de consommation de carburant

Pour le modèle de consommation de carburant, on utilise les valeurs données par défaut par le manuel d'utilisation d'AIMSUN pour une Ford Fiesta (Tableau 2.3). La signification des paramètres du modèle est expliquée dans la section 1.3.2.1.

Tableau 2.3 Paramétrage du modèle de consommation de carburant d'AIMSUN

Paramètre	Valeur	Unité
F_i	0,333	ml/s
F_1	4,70	L/100 km à 90 km/h
F_2	6,50	L/100 km à 120 km/h
c_1	0,420	ml/s
c_2	0,260	ml/s
F_d	0,537	ml/s
v_m	50,0	km/h

2.2.1.4 Paramétrage du modèle LEM

Pour LEM, le parc de voitures est considéré roulant à 100 % à l'essence et 100 % de norme Euro 1 (Panis et al., 2006). Le Tableau 2.4 résume le paramétrage entré pour les voitures dans AIMSUN.

Tableau 2.4 Paramétrage du *London Emissions Model* d'AIMSUN

Carburant		Émission standard	
Blue	0 %	Zero Emissions	0 %
Diesel	0 %	Euro 0	0 %
		Euro 1	0 %
		Euro 2	0 %
		Euro 3	0 %
		Euro 4	0 %
		Euro 5	0 %
		Euro 6	0 %
		Euro 6c	0 %
Pétrole	100 %	Euro 0	0 %
		Euro 1	100 %
		Euro 2	0 %
		Euro 3	0 %
		Euro 4	0 %
		Euro 5	0 %
		Euro 6	0 %

2.2.2 Modélisation MOVES

Une modélisation des émissions a été créée sur le logiciel MOVES à partir de la modélisation de trafic micro SRC d'AIMSUN. Le paramétrage de MOVES se fait en deux étapes : tout d'abord, la définition du cadre de la modélisation dans l'interface du logiciel, puis la création de sa base de données à partir de fichiers Excel. Ce paramétrage a été fait de manière à recréer un parc de voitures identique à celui d'AIMSUN pour pouvoir comparer ses résultats d'inventaire avec ceux des modèles environnementaux d'AIMSUN. Les camions et les bus sont modélisés dans AIMSUN, mais pas dans MOVES et leurs émissions ne sont pas comptabilisées. Les camions et les bus impactent les émissions des voitures puisqu'ils modifient le trafic sur les routes et donc les profils de vitesses des voitures. Seulement, comme ce sont ces profils de vitesses du trafic d'AIMSUN qui sont ensuite transcrits dans MOVES pour calculer les émissions des voitures uniquement, on considère que l'absence des bus et des camions dans la modélisation MOVES n'impacte pas l'inventaire des émissions des voitures.

L'objectif de cette deuxième partie de la méthodologie est ainsi de créer une modélisation des émissions sur le logiciel MOVES à partir de la modélisation de trafic AIMSUN, dans le but de faire une comparaison des estimations d'émissions. Cette comparaison est conduite entre les inventaires méso de MOVES et ceux méso et micro d'AIMSUN, soit ceux de LEM, Panis, et de la consommation de carburant. Il est aussi vérifié que le trafic modélisé dans les deux logiciels est identique à l'aide des résultats des simulations suivant : le nombre total de véhicules ainsi que les distances parcourues.

2.2.2.1 Paramétrage dans l'interface MOVES

Le paramétrage dans l'interface MOVES s'appelle le *Run Specifications (RunSpec)* et il comprend la structure globale de modélisation. Le paramétrage choisi dans le cadre de l'étude est le suivant :

- le trafic est modélisé sur un réseau de routes urbaines à accès restreint (où une vitesse minimale est exigée) ou non;
- on utilise l'échelle du comté (*County scale*), car elle nécessite moins de détails sur les routes de la modélisation de trafic, mais permet tout de même une précision suffisante. L'échelle du projet (*Project Scale*) est plus précis, mais nécessite beaucoup plus d'informations par exemple sur l'activité des véhicules hors du réseau (nombre de démarriages, de temps garé ...), sur les durées d'arrêts sur les routes, et sur les segments (vitesse moyenne, volume, longueur, pente ...);
- utilisation de la même temporalité que celle de la modélisation AIMSUN, c'est-à-dire un jour de semaine en octobre 2018 de 7h à 8h;
- pour le positionnement géographique, les comptés étant uniquement aux États-Unis, le *Grand Isle County* est choisi, car il est géographiquement proche de la région de Montréal;
- les véhicules modélisés sont uniquement les voitures (*passenger car* dans MOVES) roulant soit au diesel, à l'essence, à l'éthanol (E-85) ou avec un moteur électrique;

- on souhaite obtenir un inventaire des émissions et non pas des facteurs d'émissions en sortie. On s'intéresse ici aux émissions de CO₂ des véhicules en circulation et à l'arrêt.

2.2.2.2 Paramétrage de la base de données d'entrée de MOVES

Le paramétrage chiffré de MOVES se fait au travers d'une base de données. Pour cela, des fichiers Excel sont à remplir et à téléverser dans chaque section de l'interface de la base de données MOVES. Il y a 7 sections à compléter et le détail du paramétrage de chacune d'entre elles est expliqué ci-dessous :

- répartition des types de routes (*Road Type Distribution*);
- type de population source (*Source Type Population*);
- distances parcourues par type de véhicules (*Vehicle Type VMT*);
- répartition de l'âge des véhicules (*Age Distribution*);
- répartition des vitesses moyennes (*Average Speed Distribution*);
- carburants (*Fuel*);
- données météorologiques (*Meteorology Data*).

Distribution des types de routes (*Road Type Distribution*) :

Ce fichier Excel permet d'entrer la fraction de distance parcourue par chaque type de véhicules sur chaque type de routes.

Il y a deux types de routes dans notre modélisation MOVES : des routes urbaines à accès restreint telles que des voies rapides ou des autoroutes où une vitesse minimale est exigée et avec des bretelles d'accès et de sortie, et des routes urbaines à accès non restreint.

Dans la modélisation AIMSUN de l'arrondissement de Saint-Laurent, neuf types de routes différents sont recensés. Ce sont des routes urbaines dont quatre types sont à accès restreint : les autoroutes, les bretelles d'entrée et de sortie, et les entrecroisements d'autoroute. Le Tableau 2.5 résume la correspondance entre les types de routes d'AIMSUN et de MOVES.

Tableau 2.5 Types de routes dans AIMSUN et leur correspondance dans MOVES

Type de route AIMSUN	Type de route MOVES
Bretelle d'entrée	Route urbaine à accès restreint
Bretelle de sortie	Route urbaine à accès restreint
Autoroute	Route urbaine à accès restreint
Artère principale	Route urbaine à accès non restreint
Artère secondaire	Route urbaine à accès non restreint
Collectrice	Route urbaine à accès non restreint
Locale	Route urbaine à accès non restreint
Chemin	Route urbaine à accès non restreint
Entrecroisement	Route urbaine à accès restreint

Les kilomètres parcourus sont sommés par les voitures dans les routes AIMSUN puis la fraction de kilomètres parcourus est déduite pour chaque type de route MOVES. Ces fractions sont présentées dans le Tableau 2.6.

Tableau 2.6 Distribution des distances parcourues par type de routes MOVES

Type de route MOVES	Pourcentage des distances parcourues par les voitures dans ces types de routes
Route urbaine à accès non restreint	38,5 %
Route urbaine à accès restreint	61,5 %

Type de population source (Source Type Population) :

Ce fichier permet d'entrer le nombre de véhicules dans la simulation par type de véhicule.

Dans la base de données de sortie d'AIMSUN, 76 115 voitures différentes sont recensées en circulation durant la simulation, c'est donc ce qui est entré dans la base de données d'entrée de MOVES.

Distances parcourues par type de véhicules (Vehicle Type VMT):

VMT signifie *Vehicle Miles Traveled*. Ce fichier permet d'entrer la distance parcourue par les véhicules par type de véhicules.

En sortie d'AIMSUN, la distance parcourue par toutes les voitures durant la simulation est obtenue : 285 098 km. Avec la conversion en miles, le total est de 177 152 miles.

Répartition de l'âge des véhicules (*Age Distribution*):

Ce fichier permet d'entrer la fraction de véhicules par catégorie d'âge (une catégorie d'âge par année de 0 à 29 ans ou la catégorie de 30 ans et plus).

Des voitures de 2010 uniquement sont modélisées puisque c'est l'âge des véhicules dans le paramétrage du modèle de Panis (voir 2.2.1.2), donc de 12 ans.

Répartition des vitesses moyennes (*Average Speed Distribution*):

Ce fichier permet d'entrer une fraction représentant la répartition des véhicules par type de routes, pour chaque heure de la simulation, et par type de véhicules dans chacune des catégories de vitesses (Tableau 2.7).

Tableau 2.7 Les 16 Catégories de vitesse moyenne de MOVES

avgSpeedBinID	avgSpeedBinDesc	Min en km/h	Max en km/h
1	vitesse < 2.5mph	0	4,02
2	2.5mph <= vitesse < 7.5mph	4,02	12,07
3	7.5mph <= vitesse < 12.5mph	12,07	20,12
4	12.5mph <= vitesse < 17.5mph	20,12	28,16
5	17.5mph <= vitesse < 22.5mph	28,16	36,21
6	22.5mph <= vitesse < 27.5mph	36,21	44,26
7	27.5mph <= vitesse < 32.5mph	44,26	52,30
8	32.5mph <= vitesse < 37.5mph	52,30	60,35
9	37.5mph <= vitesse < 42.5mph	60,35	68,40
10	42.5mph <= vitesse < 47.5mph	68,40	76,44
11	47.5mph <= vitesse < 52.5mph	76,44	84,49
12	52.5mph <= vitesse < 57.5mph	84,49	92,54
13	57.5mph <= vitesse < 62.5mph	92,54	100,58
14	62.5mph <= vitesse < 67.5mph	100,58	108,63
15	67.5mph <= vitesse < 72.5mph	108,63	116,68
16	72.5mph <= vitesse	116,68	Infinie

AvgSpeedBinID est l'identifiant de la catégorie de vitesse moyenne dans la base de données de MOVES, avgSpeedBinDesc est la description de la catégorie de vitesse moyenne, et Min en km/h et Max en km/h sont la conversion des bornes des catégories de vitesse moyenne de mile par heure (mph) en km/h.

Dans la base de données de sortie d'AIMSUN, il est enregistré, pour chaque véhicule, leur temps de déplacement sur chacun des segments routiers du modèle. En divisant la longueur des segments par le temps de déplacement du véhicule, il est possible de calculer la vitesse moyenne de ce véhicule sur ce segment (véhicule-segment). Ensuite, le nombre de véhicules dans chacune des catégories de vitesse est compté pour les segments de routes à accès restreint, de même pour les segments de routes à accès non restreint. La répartition des véhicules-segments par catégorie de vitesse de MOVES pour les routes à accès restreint ou non est déduite, celle-ci est résumée au Tableau 2.8.

Tableau 2.8 Répartition des voitures dans les catégories de vitesses moyennes

Type de route MOVES	avgSpeedBinID	Pourcentage de véhicule-segment
Route urbaine à accès restreint	1	0,18 %
	2	1,48 %
	3	3,66 %
	4	2,47 %
	5	2,03 %
	6	2,08 %
	7	2,80 %
	8	6,86 %
	9	7,08 %
	10	5,54 %
	11	7,97 %
	12	14,93 %
	13	23,48 %
	14	14,89 %
	15	4,15 %
	16	0,42 %
Route urbaine à accès non restreint	1	4,30 %
	2	8,19 %
	3	6,97 %
	4	7,11 %
	5	8,80 %
	6	15,68 %
	7	27,54 %
	8	19,29 %
	9	1,97 %
	10	0,12 %
	11	0,03 %
	12	0,00 %
	13	0,00 %
	14	0,00 %
	15	0,00 %
	16	0,00 %

AvgSpeedBinID est l'identifiant des catégories de vitesse moyenne décrites au Tableau 2.7.

Carburants (Fuel):

Ce fichier permet d'entrer :

- la distribution des différents types de carburant dans les stations-service;
- la formule de composition des carburants;
- la répartition de l'utilisation de l'E-85 pour les véhicules pouvant l'utiliser;
- les fractions d'utilisation des différents carburants pour chaque type de véhicules de chaque catégorie d'âge et de chaque type de moteurs (thermiques ou électriques).

Pour les trois premiers points, les valeurs par défaut de MOVES sont utilisées. Pour le dernier, seules des voitures roulant à l'essence, peu importe l'âge et le type de motorisation sont considérées.

Données météorologiques (*Meteorology Data*):

Ce fichier permet d'entrer une valeur de température et une valeur de taux d'humidité pour l'heure de simulation.

Pour l'heure de modélisation simulée ici, les valeurs par défaut de MOVES décrites dans le Tableau 2.9 sont utilisées.

Tableau 2.9 Données météorologiques de *Grand Isle County* en octobre 2018 de 7h à 8h

Température	39,1°F/ 3,94°C
Taux d'humidité	85,2 %

2.3 Analyse de sensibilité et adaptation du paramétrage

La dernière étape de la méthodologie de cette étude est l'analyse de sensibilité. Cela consiste en une comparaison des résultats précédemment obtenus avec ceux des nouvelles modélisations avec un paramétrage différent. Chacun des paramètres étudiés est modifié une seul à la fois afin d'estimer la sensibilité de chacun sur les résultats. On effectue ici trois analyses de sensibilité différentes : une sur la modélisation de trafic dans AIMSUN avec les paramètres généraux des véhicules, une sur les paramètres d'un des modèles environnementaux d'AIMSUN, et une dernière sur le paramétrage de MOVES.

Pour les deux analyses de sensibilité dans AIMSUN, on utilise une modélisation différente de celle de Saint-Laurent, car elle est plus petite et permet de faire les calculs d'inventaires plus rapidement. En effet, une simulation à l'échelle micro (méthode SRC) prend au moins 1 heure de simulation pour le modèle de Saint-Laurent versus 5 à 10 minutes pour la modélisation plus petite. Elle provient de la formation de base qui est donnée par l'entreprise d'AIMSUN et elle modélise environ la moitié de la ville d'Innsbruck en Autriche avec des autoroutes et routes urbaines classiques, de 8h à 9h, un jour de semaine en 2015.

Concernant l'analyse de sensibilité des modèles environnementaux d'AIMSUN, seule la sensibilité du paramétrage du modèle de consommation de carburant a été analysée, car c'est le modèle qui semble le plus facilement adaptable à Montréal. En effet, dans le modèle de Panis, le paramétrage passe par les facteurs f_1 à f_6 comme expliqué en 2.2.1.2. Ceux-ci sont difficilement adaptables à Montréal, car ils sont complexes à visualiser et nécessiteraient de faire des mesures d'émissions dans des conditions similaires à l'étude de Panis en 2006. Le modèle de LEM est lui, en théorie, adaptable à MTL s'il y avait des équivalents aux normes euro pour les voitures du Québec. Seulement, le modèle de LEM ne permet pas de connaître ni les équations ni les facteurs d'émissions qui sont utilisés. Comme ce modèle a été créé à Londres, il est fortement possible que ceux-ci ne concordent pas avec le contexte de Montréal sans ajustement.

2.3.1 Analyse de sensibilité des caractéristiques des voitures d'AIMSUN

Dans AIMSUN, les véhicules sont divisés en différentes catégories dont les paramétrages sont adaptables. Ces paramètres modifiables sont à la fois ceux des modèles environnementaux, mais aussi des paramètres plus généraux sur les véhicules qui ont un impact sur le trafic et les trajectoires des véhicules. Dans cette analyse de sensibilité, on s'intéresse à ces paramètres généraux afin de voir s'il est important de les adapter au parc de véhicules de Montréal. Parmi les paramètres généraux, seuls ceux pouvant avoir un potentiel impact sur les émissions de

CO₂ et dont il serait possible d'avoir une valeur adaptée à Montréal ont été retenus pour analyser leur sensibilité. Les paramètres d'accélération et de décélération des véhicules permettent, entre autres, de définir des cycles de conduites adaptés à Montréal dont l'utilisation est fortement recommandée dans le cadre des modélisation des émissions du transport routier. Les paramètres retenus ainsi que les variations appliquées sont résumés en Tableau 2.10.

Tableau 2.10 Paramètres généraux des véhicules d'AIMSUN utilisés pour l'analyse de sensibilité et leurs variations

	<i>Augmentation</i>	<i>Diminution</i>	<i>Paramètres</i>
Dimensions des véhicules	+ 1 m	- 1 m	Longueur (moyenne & extrema)
Poids	+ 50 %	- 50 %	Poids (moyenne & extrema)
Accélération et décélération	+ 50 %	- 50 %	Maximales et décélération normale (moyenne & extrema)

L'analyse de sensibilité a été conduite avec un modèle AIMSUN plus petit que celui de l'arrondissement de Saint-Laurent comme décrit plus haut. Les modèles environnementaux d'AIMSUN sont paramétrés par défaut tel que le montrent les Tableau A II-1, Tableau A II-2 et Tableau A II-3 en ANNEXE II avec, pour la consommation de carburant, les valeurs de la Ford Escort. Le but de l'étude étant de voir l'impact relatif de la variation des paramètres généraux des véhicules sur leurs émissions, les paramétrages des modèles environnementaux n'ont pas la nécessité d'être adaptés aux conditions de Montréal. De la même manière, les variations appliquées aux paramètres généraux des véhicules ne sont pas identiques. Seulement, elles représentent à chaque fois une grande modification de ceux-ci, ce qui permet de voir s'ils ont ou non, un impact direct sur les émissions de CO₂.

Au total sept simulations ont été réalisées : une première pour le témoin, puis une pour chaque paramètre en augmentation et en diminution. Les valeurs pour les paramètres lors de la simulation témoin sont celles par défaut présentées en Tableau 2.11.

Tableau 2.11 Valeurs par défaut des paramètres généraux des véhicules d'AIMSUN utilisées pour l'analyse de sensibilité

		Moyenne	Min	Max
Principal	Longueur (en m)	4,00	3,50	4,50
Modèles dynamiques	Poids (en kg)	1179	816	2268
Modèle microscopique	Accélération max (en m/s ²)	3,00	2,60	3,40
	Décélération normale (en m/s ²)	4,00	3,50	4,50
	Décélération max (en m/s ²)	6,00	5,00	7,00

Pour les quatre modèles environnementaux d'AIMSUN, les émissions des véhicules calculées par les simulations tests, en augmentation ou en diminution, sont comparées avec celle de la simulation témoin. Les pourcentages de différences sont calculés selon l'équation (2.4) :

$$\text{Pourcentage} = \frac{\text{Valeur test} - \text{Valeur témoin}}{\text{Valeur témoin}} \quad (2.4)$$

Seule la catégorie de véhicule correspondant aux voitures est étudiée. Les simulations sont faites en micro SRC.

2.3.2 Analyse de sensibilité du paramétrage du modèle de consommation de carburant d'AIMSUN

L'objectif de cette étude est d'analyser l'impact de la modification des paramètres du modèle de consommation de carburant sur les émissions de CO₂ calculées par celui-ci. Le but est de voir quel paramètre serait le plus important à adapter au parc de véhicules de Montréal.

Comme expliqué en 1.3.2.1, le modèle de consommation de carburant comprend sept paramètres : F_i , F_d , c_1 & c_2 , F_1 & F_2 , et v_m . La simulation témoin est faite avec le paramétrage

de la Ford Fiesta tel que décrit en 2.2.1.3. Dix essais différents ont été conduits en plus de l'essai témoin en augmentant (+ 15 %) et diminuant (- 15 %) chacune des valeurs de :

- Paramètre de consommation de carburant à l'arrêt (F_i);
- Paramètre de consommation de carburant à la décélération (F_d);
- Paramètres de consommation de carburant à l'accélération (c_1 & c_2);
- Paramètres de consommation de carburant à vitesse constante (F_1 & F_2);
- Vitesse de consommation de carburant minimale à vitesse constante (v_m).

Les résultats des calculs de consommation de carburant de ces dix simulations sont ensuite comparés à ceux de la simulation témoin.

À l'aide de la base de données de sortie de la simulation témoin, il a été possible d'identifier le profil de vitesse des voitures de la simulation et ainsi identifier dans quel mode elles passent le plus de temps. Pour chaque pas de temps de 0,8 s, l'état du véhicule est identifié : à l'arrêt ($|accélération|$ plus petite ou égale à $0,5 \text{ m/s}^2$ et vitesse plus petite ou égale à 5 km/h), à vitesse constante ($|accélération|$ plus petite ou égale à $0,5 \text{ m/s}^2$ et vitesse strictement plus grande que 5 km/h), en accélération (accélération strictement plus grande que $0,5 \text{ m/s}^2$), ou en décélération (accélération strictement plus petite que $-0,5 \text{ m/s}^2$).

2.3.3 Adaptation de MOVES aux conditions montréalaises

La dernière analyse de sensibilité est celle du paramétrage de MOVES. Ici, on étudie l'adaptation du paramétrage de MOVES aux conditions montréalaises grâce aux données de la SAAQ et aux données météorologiques historiques du gouvernement du Canada. On modifie donc uniquement de la base de données d'entrée, une modification après l'autre pour voir l'impact de chacune d'entre elles. On compare ensuite les résultats des simulations avec les paramètres adaptés à Montréal avec la modélisation MOVES initiale dont le paramétrage était comparable à celui des modèles environnementaux d'AIMSUN. Le but étant de voir s'il est possible d'affiner les résultats obtenus avec le logiciel MOVES et d'identifier quels paramètres il serait utile de modifier.

Le *RunSpec* de MOVES est le même que décrit en 2.2.2.1. La simulation témoin est celle dont le paramétrage de la base de données d'entrée est décrit en 2.2.2.2, c'est-à-dire avec un parc de véhicules composé de voitures de 12 ans roulant à l'essence et avec les données météorologiques par défaut de MOVES. Quatre autres modélisations ont été créées pour les comparer à celle témoin :

- adaptation de l'âge des véhicules;
- adaptation du carburant des véhicules;
- adaptation des données météorologiques;
- adaptation du parc de véhicules et des données météorologiques.

2.3.3.1 Adaptation de l'âge des véhicules

Dans cette modélisation, uniquement le fichier de la base de données *Age Distribution* est modifié par rapport à celle témoin.

La base de données de la SAAQ recensant les véhicules immatriculés à Montréal est utilisée pour, à partir de l'année de leur modèle, obtenir les fractions de véhicules par catégorie d'âge (SAAQ, 2018). Les données de la SAAQ utilisées sont celles de 2018 décrivant des véhicules de modèle jusqu'à 2020. Les modèles de 2020 et 2019 sont peu nombreux. Ils sont regroupés à ceux de 2018 et constituent les véhicules de l'année 0 dans MOVES. La répartition dans les catégories d'âge est résumée en Tableau 2.12.

Tableau 2.12 Répartition de l'âge des voitures du parc Montréalais

âge	Pourcentage	âge	Pourcentage	âge	Pourcentage
0	8,41 %	11	5,67 %	21	0,26 %
1	7,45 %	12	4,40 %	22	0,14 %
2	7,40 %	13	4,12 %	23	0,15 %
3	7,19 %	14	2,99 %	24	0,08 %
4	6,18 %	15	2,73 %	25	0,07 %
5	6,66 %	16	1,76 %	26	0,07 %
6	6,49 %	17	1,13 %	27	0,06 %
7	5,76 %	18	0,89 %	28	0,05 %
8	6,94 %	19	0,61 %	29	0,04 %
9	5,69 %	20	0,45 %	30	0,38 %
10	5,75 %				

La colonne âge est l'identifiant de la catégorie d'âge dans la base de données de MOVES et celle pourcentage est le pourcentage de véhicules dans la catégorie d'âge. Il est constaté que 43,3 % des modèles de véhicules datent de cinq ans ou moins, et que seulement 20,4 % ont 12 ans ou plus.

2.3.3.2 Adaptation du carburant des véhicules

Dans cette simulation, uniquement le fichier de la base de données *Fuel* est modifié par rapport à celle témoin. Dans celui-ci, les seules données modifiées sont celles concernant les fractions d'utilisation des différents carburants pour chaque type de véhicules de chaque catégorie d'âge et de chaque type de moteurs (thermiques ou électriques).

Pour adapter le paramétrage aux conditions montréalaises, on utilise les données de la SAAQ de 2018 où 14 types de carburants sont répertoriés (SAAQ, 2018). Seulement, dans MOVES il n'existe que quatre types de carburants. Les véhicules n'appartenant donc pas à ces types de carburants ne sont pas comptabilisés pour le calcul des fractions dans MOVES. Le résultat de la répartition est résumé en Tableau 2.13.

Tableau 2.13 Répartition de l'utilisation des carburants dans MOVES à partir des données de la SAAQ

MOVES		SAAQ		
Carburant	Fraction	Carburant	Comptage	Fraction
Diesel	1,32 %	Autre	39	0,01 %
Essence	98,30 %	Hydrogène	0	0,00 %
Électricité	0,38 %	Diesel	9 445	1,30 %
Éthanol (E-85)	0,00 %	Essence	702 823	96,70 %
		Hybride	9 419	1,30 %
		Électricité	2 717	0,37 %
		Méthanol	0	0,00 %
		Gaz naturel	87	0,01 %
		Propane	280	0,04 %
		Non-propulsé	2	0,00 %
		Éthanol	0	0,00 %
		Hybride branchable	2 003	0,28 %
		Non précisé	0	0,00 %
Comptage total SAAQ		726 815	Véhicules	
Comptage total MOVES		714 985	Véhicules	
Différence		11 830	1,63 %	

Il y a donc 1,6 % des véhicules de la SAAQ qui ne sont pas pris en compte ici pour le calcul des fractions de véhicules par type de carburant dans MOVES.

2.3.3.3 Adaptation des données météorologiques

Dans cette modélisation, uniquement le fichier de la base de données *Meteorology data* est modifié par rapport à celle témoin.

Dans cette étude, les données historiques du site climat.meteo.gc.ca sont utilisées pour la station météorologique MONTREAL/PIERRE ELLIOTT TRUDEAU INTL (Gouvernement du Canada, 2022) la journée du lundi 15 octobre 2018. Les relevés étant effectués toutes les heures, la moyenne du relevé de 7 h et 8 h est calculées pour la modélisation MOVES, les résultats sont présentés en Tableau 2.14.

Tableau 2.14 Données météorologiques de Montréal en octobre 2018

	07h00	08h00	Moyenne utilisée
Température	7,4 °C	8,8 °C	8,1 °C soit 46,58 °F
Humidité relative	83 %	83 %	83 %

2.3.3.4 Adaptation du parc de véhicules et des données météorologiques

Dans cette dernière modélisation, les trois adaptations précédentes sont utilisées : l'adaptation de l'âge des véhicules, de leur carburant et des données météorologiques de Montréal. Le reste des données est identique à la modélisation témoin.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

Ce paragraphe présente les résultats et les premières interprétations de l'application de la méthodologie décrite au Chapitre 2.

3.1 Modélisation de la circulation

Comme expliqué en 2.1.2, la modélisation AIMSUN du SUM doit être modifiée pour utiliser les modèles environnementaux du logiciel. Deux modifications doivent être appliquées : le changement d'échelle, de méso à micro, et le changement de méthode d'affectation des chemins, de DUE à SRC. Il est alors nécessaire d'étudier dans quelles mesures ces modifications affectent les résultats de simulation (le trafic sur les routes et les émissions induites par ce dernier).

3.1.1 Impact du changement de méthode d'affectation des chemins

Le facteur important permettant de vérifier la similitude de ces deux modélisations est le nombre de véhicules attendant dehors. Ce sont des véhicules créés par la simulation pour répondre à la demande de trafic renseignée dans les matrices OD, qui n'ont pas pu entrer dans la simulation à cause de la congestion. Ce nombre de véhicules attendant dehors permet de voir si la demande de déplacements est bien respectée par la simulation. En l'occurrence, le Tableau 3.1 résume la différence entre les deux modélisations (voir l'équation (2.1) pour le calcul du pourcentage) qui est de l'ordre de seulement 2,8 % pour le nombre de véhicules attendant dehors. Leurs variations au cours de la simulation sont pourtant très différentes (voir Figure 3.1). En effet, même si les véhicules se rendent, comme prévu par la demande de déplacements, d'un point A à un point B, leurs trajets sont différents en fonction de la méthode d'affectation des chemins et l'échelle de modélisation. Ceci crée plus ou moins de congestion

et laisse donc plus ou moins d'espace pour faire rentrer de nouveaux véhicules dans la simulation. Quant aux émissions de CO₂, la différence entre les inventaires à la fin des deux simulations est très faible (moins de 1 %).

Tableau 3.1 Comparaison des résultats de la modélisation méso SRC avec celle méso DUE

Modélisation méso SRC par rapport à la modélisation méso DUE initiale		
<i>Émissions de CO₂</i>	- 0,9 %	0,5 t CO ₂
<i>Émissions de CO₂/densité de voitures</i>	+ 1,3 %	0,1 t CO ₂ .km/veh
<i>Émissions de CO₂/distance parcourue</i>	- 0,4 %	0,001 kg CO ₂ /km
<i>Comptage en entrée</i>	- 0,7 %	524 veh
<i>Véhicules à l'intérieur</i>	- 4,0 %	291 veh
<i>Densité</i>	- 2,2 %	0,14 veh/km
<i>Distance parcourue</i>	- 0,6 %	1 600 km
<i>Véhicules attendant dehors</i>	+ 2,8 %	10 veh
<i>Nombre de changements de voie</i>	- 3,0 %	5 200
<i>Queue moyenne</i>	- 3,4 %	79 veh

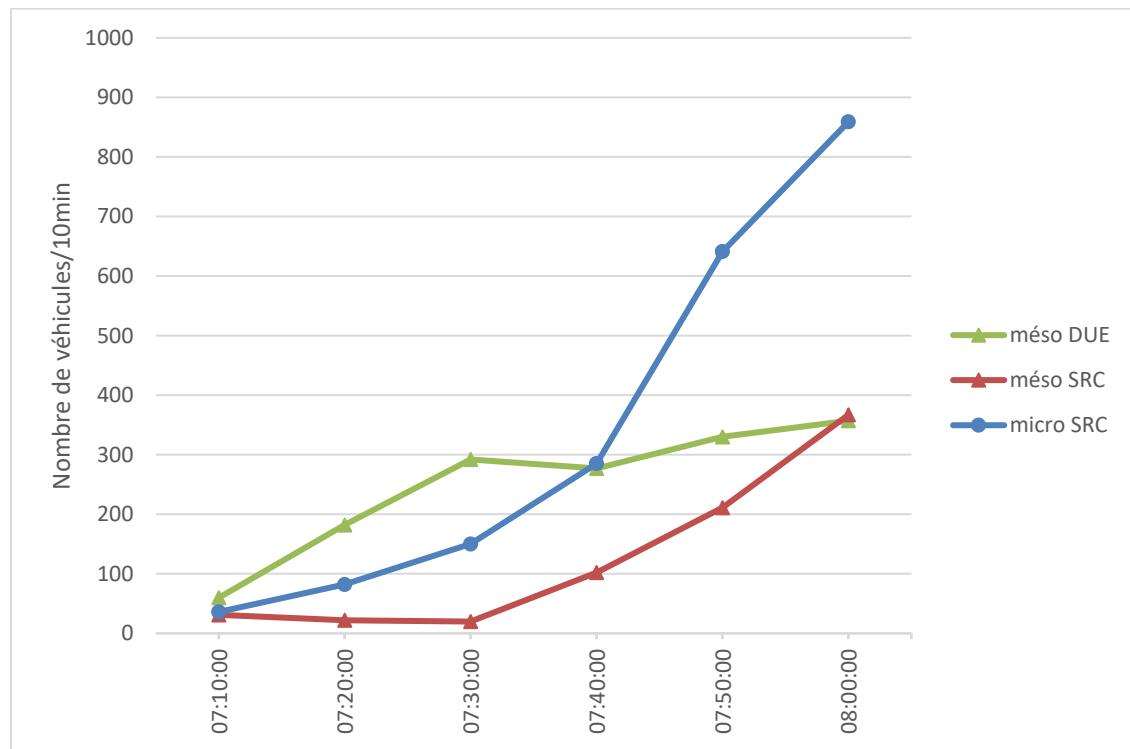


Figure 3.1 Évolution du nombre de voitures attendant dehors

3.1.2 Impact du changement d'échelle de modélisation

Comme présenté dans le Tableau 3.2 (voir l'équation (2.2) pour le calcul du pourcentage), la modélisation micro SRC estime plus d'émissions que la modélisation méso SRC (+ 7 %). En normalisant les émissions, on retrouve les mêmes résultats que pour la comparaison micro SRC et méso DUE, ce qui signifie que la plus grosse différence d'estimation d'émissions vient du passage de l'échelle méso à micro et non pas de DUE à SRC. Les variables de simulation montrent que la modélisation micro SRC a tendance à être plus congestionnée que celle méso SRC (densité et queue moyenne plus élevée, distance parcourue plus faible...), ce qui fait augmenter les émissions. Malgré le pourcentage élevé de différence de véhicules attendant dehors, celui-ci reste acceptable puisqu'à la fin de la simulation micro SRC, seulement 860 véhicules attendent dehors sur un total d'environ 80 000 entrant au cours de la simulation, soit environ 1 % de la demande qui n'est pas respectée.

Tableau 3.2 Comparaison des résultats de la modélisation micro SRC avec celle méso SRC

Modélisation micro SRC par rapport à la modélisation méso SRC		
<i>Émissions de CO₂</i>	+ 7,0 %	3,9 t CO ₂
<i>Émissions de CO₂/densité de voitures</i>	- 21 %	1,5 t CO ₂ .km/veh
<i>Émissions de CO₂/distance parcourue</i>	+ 10 %	0,02 kg CO ₂ /km
<i>Comptage en entrée</i>	+ 0,2 %	165 veh
<i>Véhicules à l'intérieur</i>	+ 29 %	12 100 veh
<i>Densité</i>	+ 29 %	1,9 veh/km
<i>Distance parcourue</i>	- 3,0 %	8 600 km
<i>Véhicules attendant dehors</i>	+ 130 %	492 veh
<i>Nombre de changements de voie</i>	+ 150 %	262 000
<i>Queue moyenne</i>	+ 34 %	776 veh

3.1.3 Bilan du passage de méso DUE à micro SRC

D'après le Tableau 3.3 (voir l'équation (2.3) pour le calcul du pourcentage), la modélisation micro SRC calcule plus d'émissions de CO₂ que la modélisation méso DUE (+ 6 %). En

normalisant les émissions en densité de véhicules c'est la modélisation méso DUE qui passe devant alors qu'en normalisant par km parcouru, la micro SRC reste devant en creusant l'écart. Les variables de simulation montrent que la simulation micro SRC a tendance à être plus congestionnée que celle méso DUE. Cependant, comme expliqué en 3.1.2, le nombre de véhicules attendant dehors reste acceptable.

Tableau 3.3 Comparaison des résultats de la modélisation micro SRC avec celle méso DUE

Modélisation micro SRC par rapport à la modélisation méso DUE initiale		
<i>Émissions de CO₂</i>	+ 6,0 %	3,4 t CO ₂
<i>Émissions de CO₂/densité de voitures</i>	- 20 %	1,4 t CO ₂ .km/veh
<i>Émissions de CO₂/distance parcourue</i>	+ 10 %	0,02 kg CO ₂ /km
<i>Comptage en entrée</i>	- 0,5 %	359 veh
<i>Véhicules à l'intérieur</i>	+ 27 %	11 400 veh
<i>Densité</i>	+ 27 %	1,7 veh/km
<i>Distance parcourue</i>	- 3,6 %	10 300 km
<i>Véhicules attendant dehors</i>	+ 140 %	502 veh
<i>Nombre de changements de voie</i>	+ 140 %	257 000
<i>Queue moyenne</i>	+ 29 %	697 veh

En comparant les trois modélisations, on remarque que c'est bien le passage de l'échelle méso à micro qui a le plus d'impact sur la simulation. En regardant la variation de la densité de véhicules au cours des trois simulations Figure 3.2, on constate les variations des simulations méso DUE et SRC sont sensiblement identiques et inférieures à celle micro SRC qui est toujours nettement au-dessus.

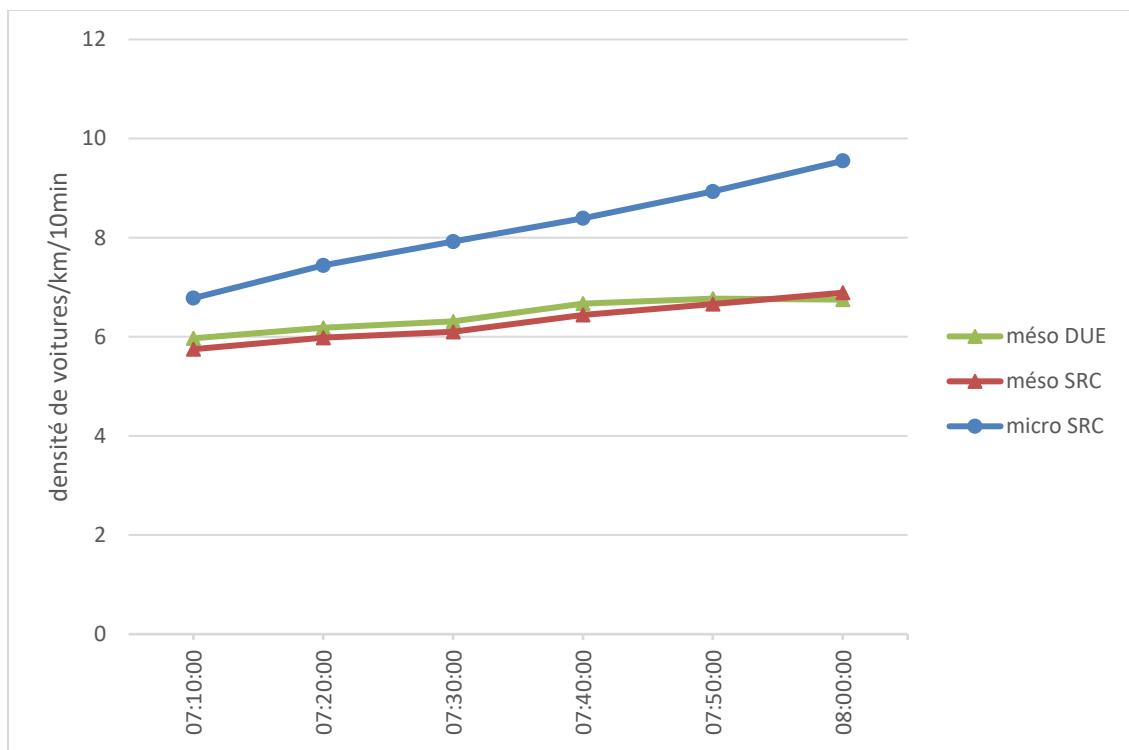


Figure 3.2 Évolution de la densité de voitures

Malgré les différences sur certains paramètres, la modélisation finale micro SRC semble être valide puisque la demande de déplacements est respectée. En effet, le nombre de véhicules attendant dehors en fin de simulation est acceptable (Figure 3.1) et le nombre de véhicules entrant dans la simulation à la Figure 3.3 est quasiment identique pour les trois modélisations.

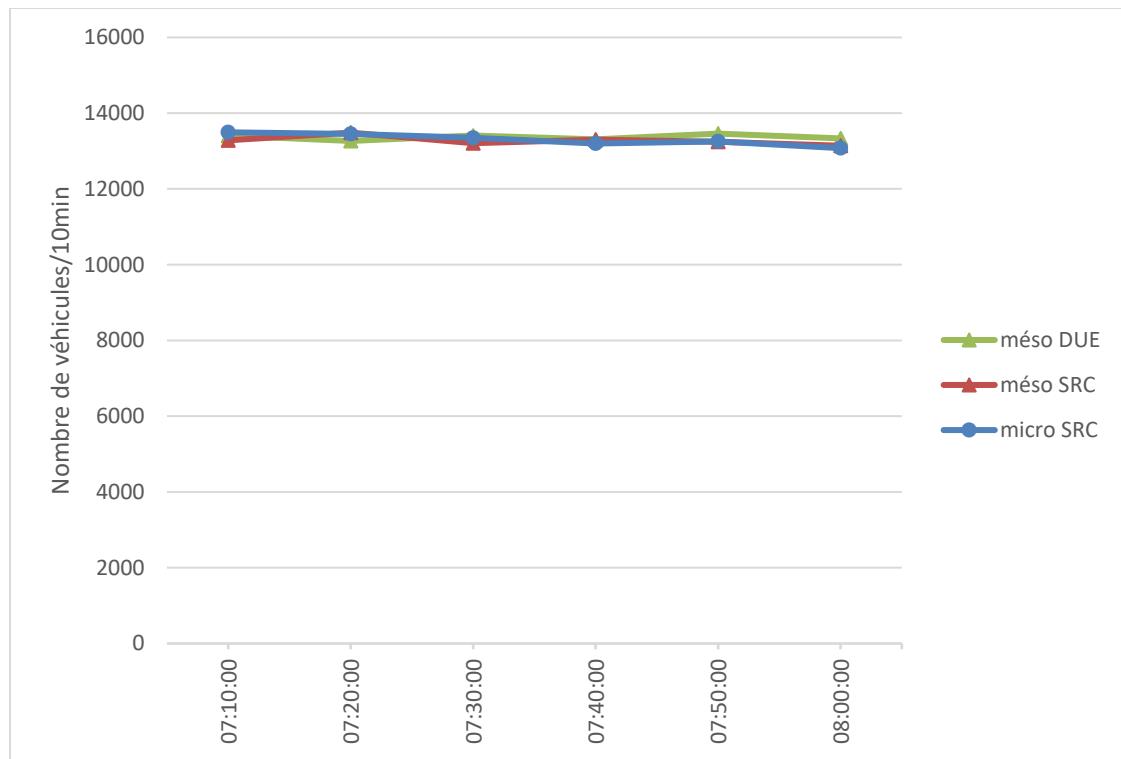


Figure 3.3 Évolution du comptage en entrée des voitures

Finalement, d'après la Figure 3.4, les émissions de CO₂ calculées pour les trois simulations sont du même ordre de grandeur. C'est le passage de l'échelle méso à micro qui impacte le plus les émissions de CO₂ qui sont quasiment linéaires au cours de la simulation micro SRC (Figure 3.5). La différence entre les inventaires du LEM des simulations méso DUE et méso SRC est très faible (< 1 %). En conclusion, à l'échelle micro, les estimations d'émissions sont légèrement plus élevées qu'à l'échelle méso (+ 6 %), ce qui semble logique. En effet, l'échelle micro modélise les véhicules en continu lors de leurs trajets avec l'ensemble de leurs accélérations et décélérations, alors que celle méso modélise leurs vitesses et accélérations moyennes.

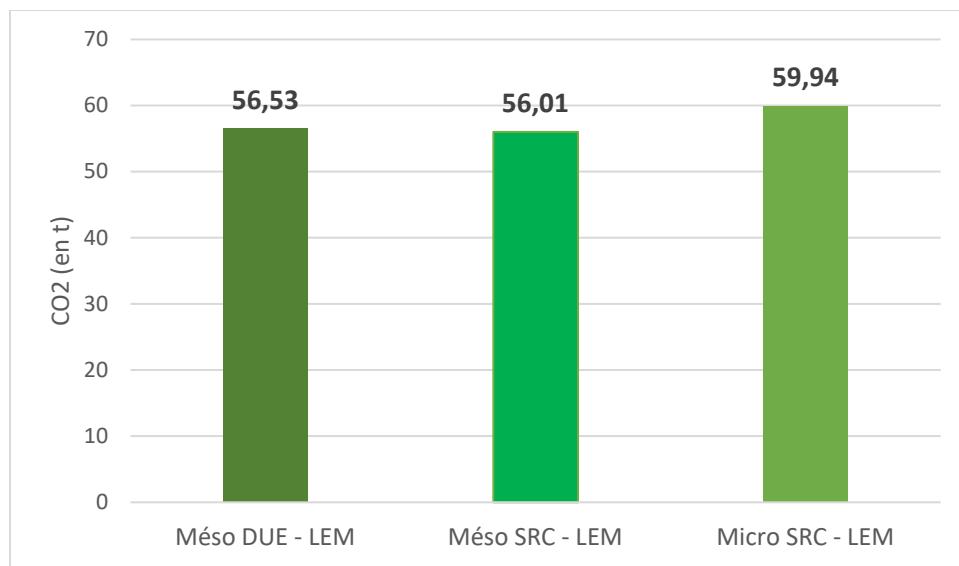


Figure 3.4 Émissions totales de CO₂ calculées par LEM

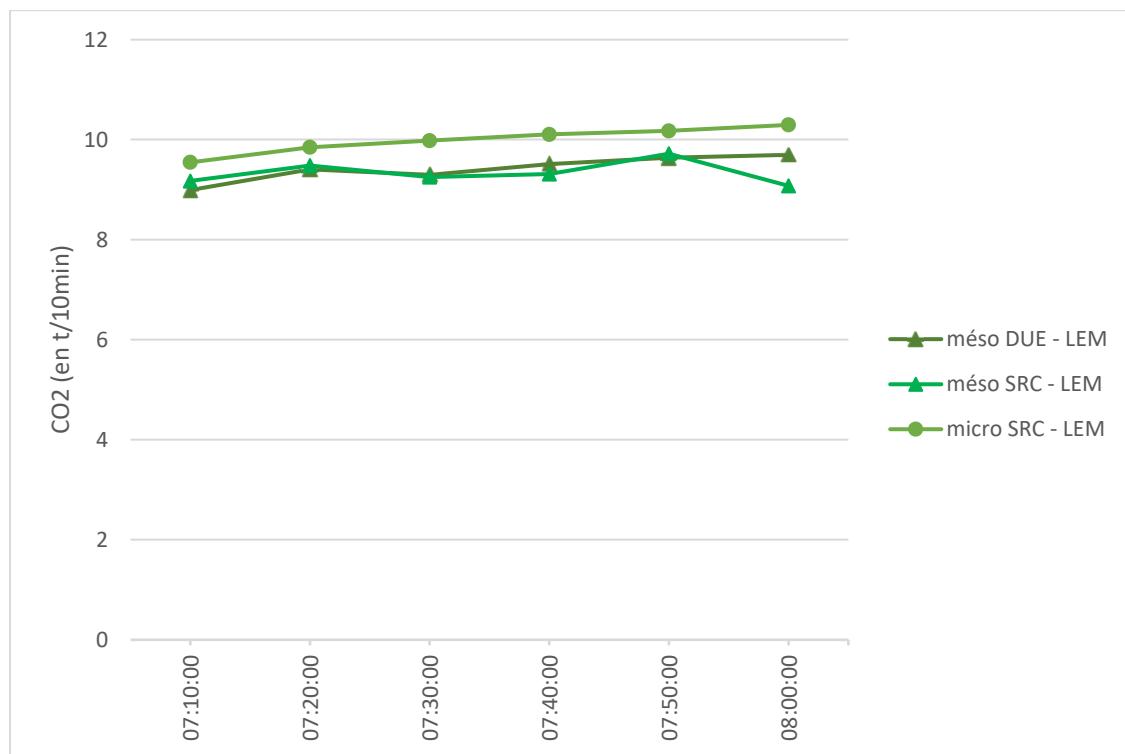


Figure 3.5 Variation des émissions de CO₂ calculées par le modèle LEM

3.2 Modélisation des émissions

Dans cette deuxième partie des résultats, les modélisations des émissions de CO₂ qui ont été réalisées à partir de la modélisation de trafic AIMSUN en micro SRC sont étudiées.

3.2.1 Modèles environnementaux d'AIMSUN

Avec la modélisation micro SRC décrite précédemment, on obtient les estimations d'émissions suivantes pour les modèles environnementaux de LEM, de Panis et de consommation de carburant.

D'après la Figure 3.6, les tendances d'émissions de CO₂ sont relativement identiques pour les différents modèles environnementaux, elles sont en augmentation durant la simulation. Entre le résultat de Panis qui estime le plus d'émissions et celui de LEM qui en estime le moins, il y a 12 % de différence (Figure 3.7).

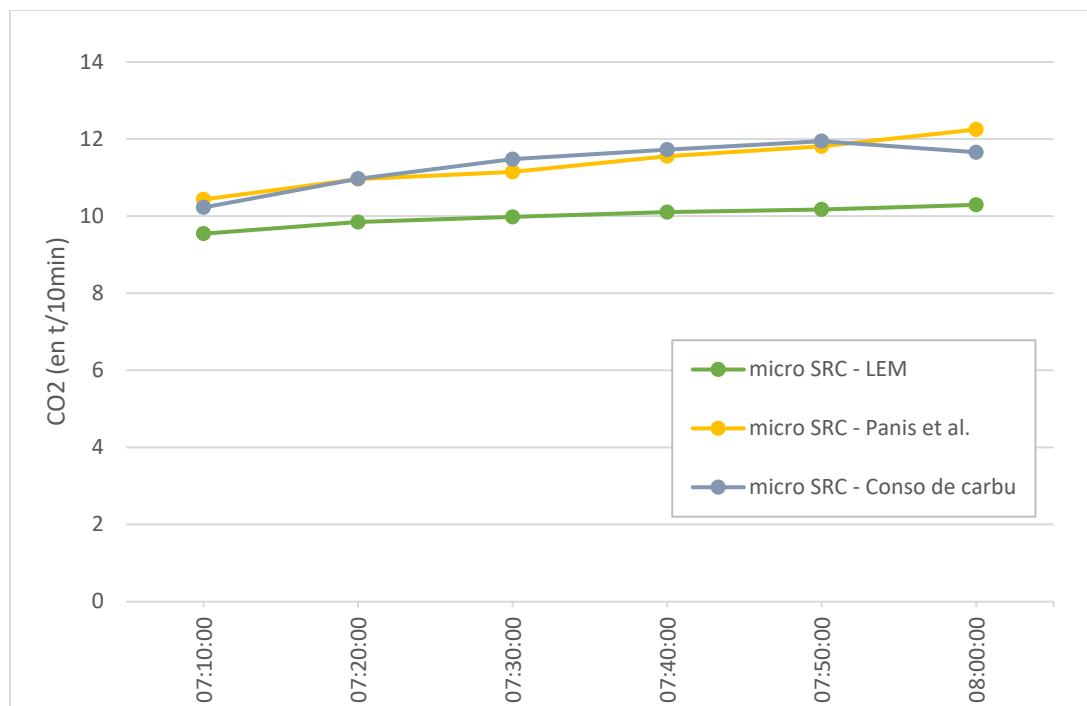


Figure 3.6 Variation des émissions de CO₂ calculées par les trois modèles environnementaux d'AIMSUN

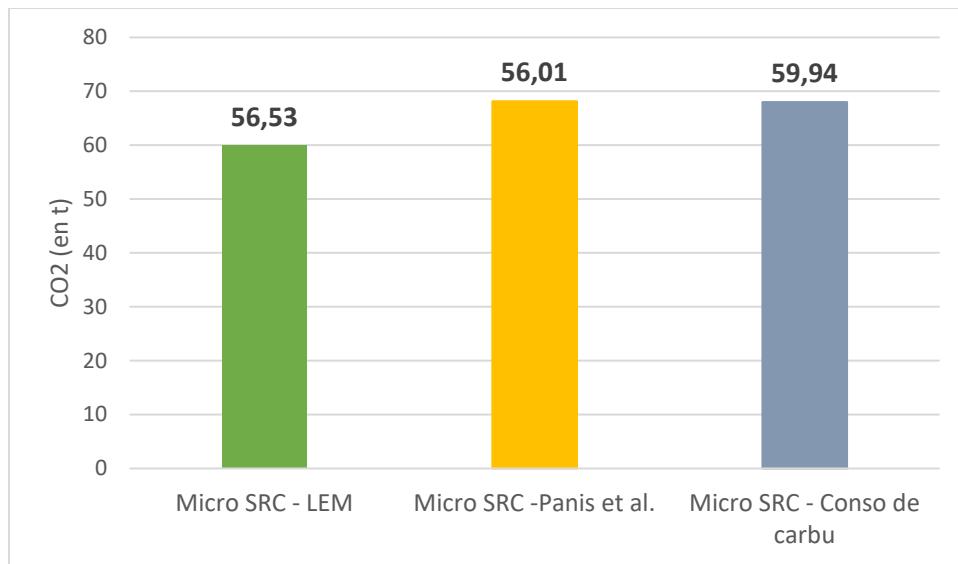


Figure 3.7 Émissions totales de CO₂ des voitures pour les 3 modèles environnementaux d'AIMSUN

Les modèles de Panis et de consommation de carburant sont plus proches au cours de la simulation comme on le voit sur la Figure 3.6. Celui de LEM estime moins d'émissions que les deux autres et leur écart, croissant au cours de la simulation, est en moyenne de presque 12 % (Tableau 3.4). Sachant que les modèles de Panis et de consommation de carburant sont des modèles micro et que LEM est un modèle de calcul d'émissions méso, les résultats observés semblent cohérents. En effet, le modèle de LEM, pouvant être utilisé à l'échelle méso ou micro, utilise les vitesses moyennes des véhicules et non pas leur profil de vitesse et d'accélération instantanée.

Tableau 3.4 Différence au cours de la simulation des taux d'émissions entre LEM et les autres modèles environnementaux d'AIMSUN

Temps	Pourcentages de différence entre LEM et :	
	Panis	Consommation de carburant
07:10:00	8,51 %	6,67 %
07:20:00	10,16 %	10,24 %
07:30:00	10,49 %	13,06 %
07:40:00	12,56 %	13,83 %
07:50:00	13,86 %	14,82 %
08:00:00	15,97 %	11,69 %

3.2.2 Inventaires d'émissions de MOVES et d'AIMSUN

Une modélisation MOVES a été créée telle qu'expliquée en 2.2.2 à partir de celle de Saint-Laurent d'AIMSUN. Elles modélisent donc toutes les deux le même réseau avec le même niveau de circulation et le même parc de voitures. Le but est alors de comparer les inventaires d'émissions de CO₂ calculés par les trois modèles environnementaux d'AIMSUN et celui de MOVES.

Le nombre de voitures ainsi que les distances qu'elles parcourent sont exactement identiques en sortie des simulations de MOVES et d'AIMSUN, on peut donc considérer ces deux simulations comme comparables. Le Tableau 3.5 présente les résultats des inventaires d'émissions de CO₂ de MOVES et de modèles environnementaux d'AIMSUN.

Tableau 3.5 Inventaires d'émissions de CO₂ calculés par MOVES et les modèles environnementaux d'AIMSUN pour la modélisation de Saint-Laurent

		Inventaire (en kg)	Normalisé par km (en kg/km)
AIMSUN	<i>LEM</i>	59 940	0,2102
	<i>Panis et al.</i>	68 150	0,2391
	<i>Consommation de carburant</i>	68 000	0,2385
MOVES	<i>Total</i>	69 660	0,2443
	Routes urbaines uniquement	61 620	0,2161

Comme vu en 3.2.1, les estimations d'émissions les plus élevées dans AIMSUN sont celles de Panis et de la consommation de carburant, ce qui est logique puisqu'elles sont faites à l'échelle micro.

L'inventaire total de MOVES estime plus d'émissions que les inventaires d'AIMSUN, 2,2 % de plus que l'inventaire de Panis par exemple, mais ils ne tiennent pas compte des mêmes phénomènes. Dans la base de données de sortie de MOVES, le détail de la provenance des émissions permet de distinguer les émissions sur routes urbaines et celles hors routes (*off network*). Les émissions sur routes urbaines correspondent aux émissions liées uniquement à l'énergie nécessaire pour le déplacement des véhicules (vitesse > 1 mph). Les émissions hors route correspondent, elles, aux émissions dues au surplus d'énergie nécessaire pour le préchauffage du moteur (55 % des émissions hors route ici), pour les accessoires tels que la climatisation par exemple, et la consommation de carburant lorsque le véhicule est à l'arrêt pendant son trajet (arrêt ou faible vitesse non pas lié aux conditions de circulation, mais à un stationnement par exemple). Maintenant, si l'on regarde l'inventaire MOVES en ne considérant que les émissions des véhicules sur routes urbaines, elles sont de l'ordre de celles estimées par LEM, ce qui semble logique puisque l'inventaire de MOVES est lui aussi effectué à l'échelle méso. Cela démontre cependant qu'il y a environ 8 000 kg de CO₂, soit environ 12 % des émissions totales, qui ne sont pas prises en compte dans les inventaires d'AIMSUN.

Ces émissions correspondent à toutes les consommations de carburants additionnelles liées à l'utilisation du véhicule en dehors de son déplacement.

Finalement, l'intérêt de MOVES est relatif puisqu'il est plus complexe à utiliser qu'AIMSUN et qu'il n'est pas aussi précis que les simulations à l'échelle micro d'AIMSUN. Cependant, MOVES prend en compte plus de phénomènes que les modèles d'AIMSUN, ce qui implique une incertitude sur les résultats des modèles d'AIMSUN.

3.3 Analyses de sensibilité et adaptation du paramétrage

Dans cette dernière partie, une étude de l'impact des choix de paramétrage des modélisations est conduite afin de vérifier la sensibilité des résultats d'inventaires d'émissions à ces derniers. Comme expliqué en 2.3, trois analyses de sensibilité ont donc été conduites.

3.3.1 Analyse de sensibilité des caractéristiques des voitures d'AIMSUN

Dans cette analyse de sensibilité, trois types de paramètres ont été testés en augmentation et en diminution importante afin de voir l'impact potentiel sur les émissions de CO₂ des véhicules.

La dimension des véhicules pourrait impacter la congestion dans la modélisation. Si tel est le cas, on devrait observer une augmentation de la consommation de carburant et des émissions de GES. Le poids des véhicules impacte directement leur consommation de carburant et donc leurs émissions. Cependant, au moment de l'étude, le manuel d'utilisateur d'AIMSUN n'expliquait pas comment était utilisé ce paramètre dans le modèle. Si celui-ci est bien pris en compte par les modèles environnementaux d'AIMSUN, les émissions de GES et la consommation de carburant des véhicules devraient augmenter avec l'augmentation du poids des véhicules et inversement avec sa diminution. Finalement, les paramètres d'accélération et de décélération des véhicules sont proportionnels aux accélérations et décélérations des véhicules. Comme expliqué en revue de littérature (entre autres avec Abou-Senna et al., 2013),

les émissions des GES sont très sensibles aux accélérations des véhicules. On devrait donc observer une augmentation des émissions de GES et de la consommation de carburant lors de l'augmentation des paramètres d'accélération et de décélération, et l'inverse lors de leur diminution.

Les résultats des comparaisons des tests des trois paramètres avec la simulation témoin sont présentés dans les sections suivantes et un bilan est dressé dans la dernière partie.

3.3.1.1 Test de la sensibilité de la dimension des véhicules

Les deux tests comparés ici à la simulation témoin sont celui avec la longueur des véhicules augmentée d'un mètre (test en augmentation) et la longueur des véhicules diminuée d'un mètre (test en diminution) par rapport à la longueur par défaut de la simulation témoin. Les longueurs maximales et minimales des véhicules sont aussi, respectivement, augmentées ou diminuées d'un mètre. Tous les autres paramètres des véhicules sont laissés inchangés, identiques au test témoin. Le Tableau 3.6 résume les pourcentages de différence obtenus entre les résultats de la simulation test et celle témoin par rapport à celle témoin (voir équation (2.4)). Les pourcentages sont bleus lorsque le résultat de la simulation test est plus petit que celui de la simulation témoin et orange à l'inverse.

Tableau 3.6 Résultats de l'analyse de sensibilité de la longueur des véhicules dans AIMSUN

AU TOTAL SUR TOUTE LA SIMULATION			
Test en :	Comptage en entrée	Distance parcourue	
Augmentation	0,00 %		- 1,89 %
Diminution	0,00 %		- 0,15 %
Test en :	LEM	Panis	Consommation de carburant
Augmentation	- 0,53 %	+ 1,11 %	- 1,17 %
Diminution	- 1,59 %	- 2,66 %	- 2,32 %
À L'INSTANT FINAL DE LA SIMULATION			
Test en :	LEM	Panis	Consommation de carburant
Augmentation	+ 23,89 %	+ 34,84 %	+ 4,71 %
Diminution	- 11,98 %	- 15,47 %	- 22,44 %

Le même nombre de véhicules est entré dans les trois simulations, mais ils parcourent des distances légèrement plus courtes dans les simulations tests, surtout celle avec les véhicules plus longs (- 1,9 %). La Figure 3.8 représente la variation des distances parcourues par les voitures dans les trois simulations. Jusqu'à 8h45, les voitures du test en diminution parcourent globalement plus de distance que celles du test témoin. Ceci semble relativement cohérent puisque les véhicules étant plus petits, il y en a donc plus dans la simulation. À l'inverse, pour le test en augmentation, les voitures parcourent globalement moins de distances. À partir de 8h50, la distance parcourue par les voitures de la simulation en diminution chute ce qui est sûrement dû au fait qu'il y a de moins en moins de véhicules dans la simulation car les véhicules ont déjà complété leur trajet. La Figure 3.9 présente le retard accumulé par les voitures des trois simulations. Il représente la différence entre le temps de trajet dans des conditions idéales de circulation et celui qu'il faut effectivement à la voiture pour le réaliser. Il y a plus de retard accumulé par les voitures du test en augmentation, ce qui laisse comprendre qu'il y a aussi plus de congestion. Le constat est inversé pour le test en diminution, ce qui montre que le trafic y est bien plus fluide. Au dernier instant des simulations, il y a environ autant de véhicules dans la simulation du test en diminution et celle témoin et il y a deux fois plus de véhicules encore en circulation dans celle en augmentation. Finalement, la simulation avec des véhicules plus grands est plus congestionnée et donc ses véhicules n'ont pas le temps

de finir leur trajet, ce qui explique la différence de distance parcourues. Dans la simulation avec des véhicules plus petits, ceux-ci ont plus rapidement fini leur trajet car il y a moins de congestion. La légère différence dans les distances parcourues peut être due au fait que les véhicules prennent plus souvent le chemin direct pour se rendre à leur destination puisqu'il y a moins de congestion que dans la simulation témoin.

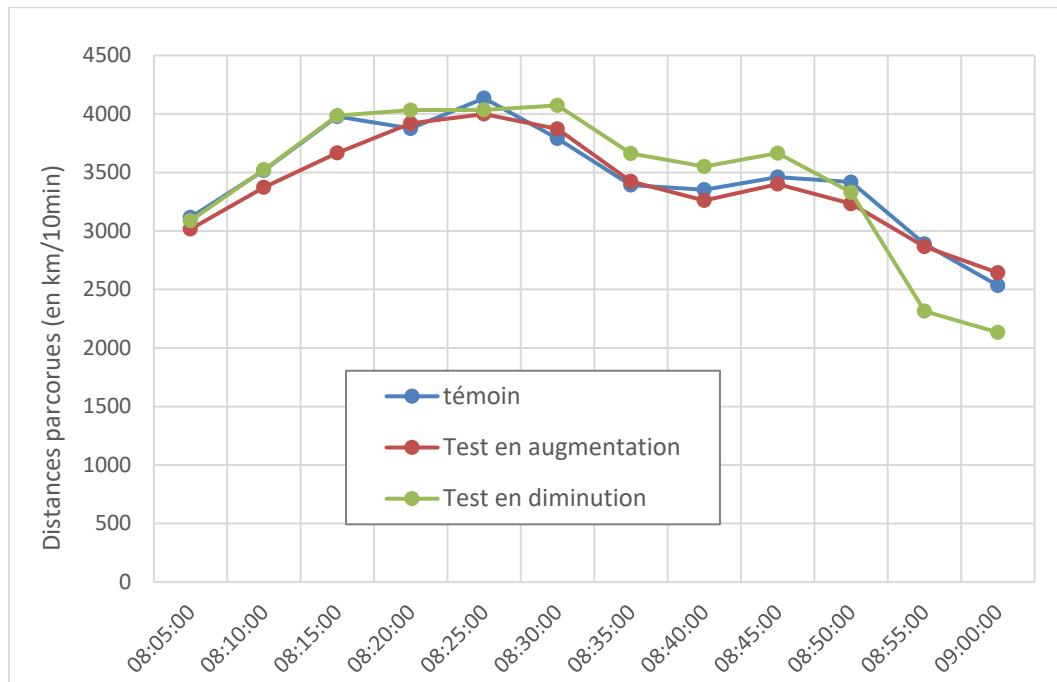


Figure 3.8 Distances parcourues par les voitures sortis des simulations de l'analyse de sensibilité de la longueur des véhicules

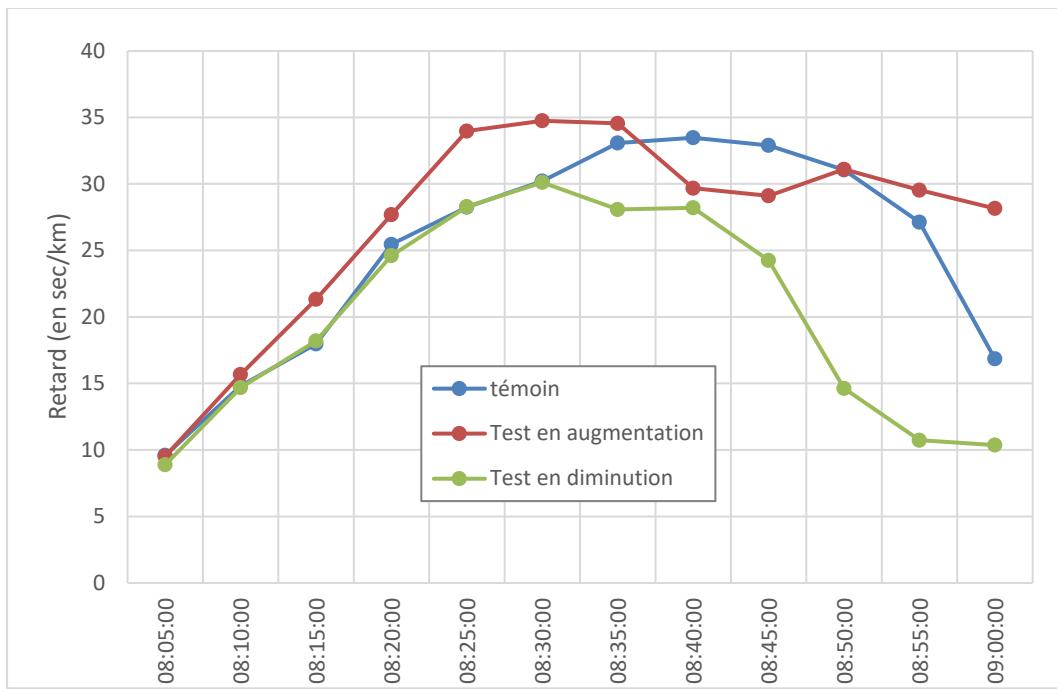


Figure 3.9 Retard accumulé par les voitures des simulations de l'analyse de sensibilité de la longueur des véhicules

Sur la totalité de la simulation, l'impact de la modification de la longueur des véhicules est relativement faible (2,7 % au maximum). Il est plus important pour les véhicules de longueur plus petite que pour les véhicules de longueur plus grande. Le modèle de Panis est le seul à estimer plus d'émissions que la simulation témoin pour le test en augmentation malgré le fait que la simulation du test en augmentation soit plus congestionnée.

En revanche, pour les trois modèles environnementaux, la variation des estimations d'émissions au cours des simulations sont toutes proportionnelles à la longueur des véhicules en fin de simulation. La différence avec la simulation témoin est plus ou moins importante suivant les modèles environnementaux, mais c'est toujours le test en augmentation qui estime le plus d'émissions au dernier instant de la simulation et celui en diminution qui en estime le moins. Comme on peut le voir sur la Figure 3.10 pour le modèle de LEM, la différence entre les simulations se fait dans les derniers instants de la simulation où la circulation se fluidifie (diminution du retard pris par les voitures visible sur la Figure 3.9). L'évolution des émissions de CO₂ des autres modèles environnementaux a la même tendance que pour celui de LEM (voir ANNEXE III).

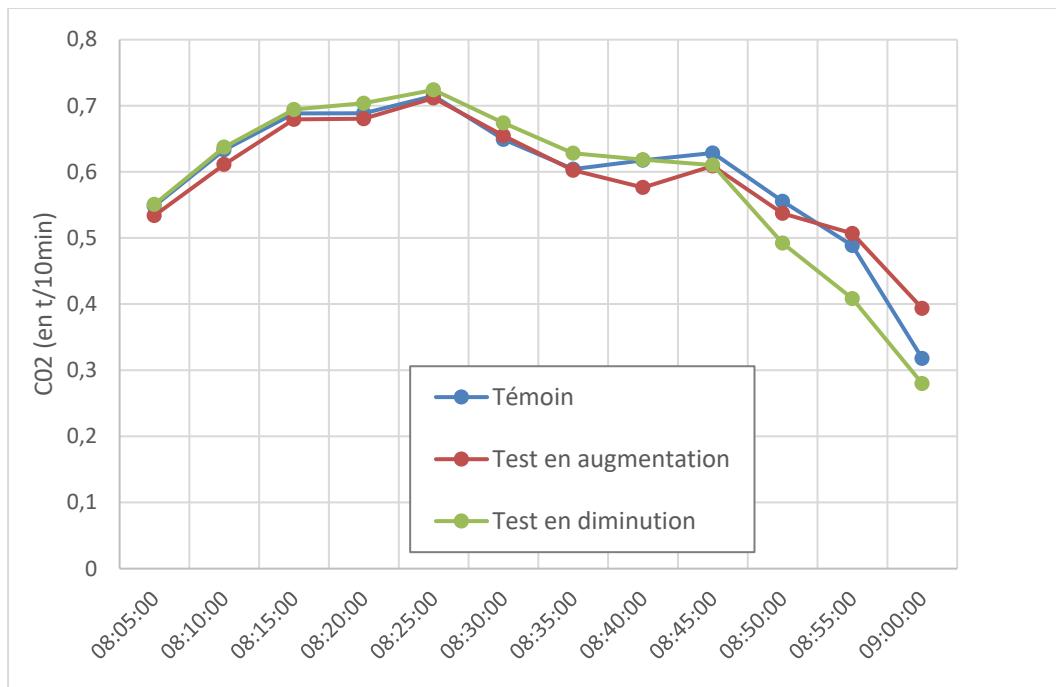


Figure 3.10 Émissions de CO₂ des voitures calculées par LEM pour les tests de l'analyse de sensibilité de la longueur des véhicules

3.3.1.2 Test de la sensibilité du poids des véhicules

Les deux tests comparés ici à la simulation témoin sont celui avec le poids des véhicules augmenté de 50 % (test en augmentation) et le poids des véhicules diminué de 50 % (test en diminution) par rapport au poids par défaut de la simulation témoin. Les valeurs de poids maximum et minimum sont elles aussi respectivement augmentées ou diminuées de 50 %. Tous les autres paramètres restent inchangés, même ceux liés à la consommation de carburant qui sont, dans la réalité, impactés par la variation du poids des véhicules. Le Tableau 3.7 résume les pourcentages de différence obtenus entre les résultats de la simulation test et celle témoin par rapport à celle témoin (voir équation (2.4)). Les pourcentages sont bleus lorsque le résultat de la simulation test est plus petit que celui de la simulation témoin et orange à l'inverse.

Tableau 3.7 Résultats de l'analyse de sensibilité du poids des véhicules dans AIMSUN

AU TOTAL SUR TOUTE LA SIMULATION			
Test en :	Comptage en entrée	Distance parcourue	
Augmentation	0,00 %		- 0,08 %
Diminution	0,00 %		- 0,08 %
Test en :	LEM	Panis	Consommation de carburant
Augmentation	- 0,31 %	+ 0,24 %	+ 0,05 %
Diminution	- 0,31 %	+ 0,24 %	+ 0,05 %
À L'INSTANT FINAL DE LA SIMULATION			
Test en :	LEM	Panis	Consommation de carburant
Augmentation	- 2,37 %	- 2,18 %	- 2,24 %
Diminution	- 2,37 %	- 2,18 %	- 2,24 %

Même si le nombre de véhicules entrant dans le modèle est identique pour les trois simulations, les deux simulations tests ont des distances totales parcourues par les voitures exactement identiques mais légèrement plus petites que celle témoin.

Concernant les inventaires d'émissions, pour les trois modèles environnementaux, ils sont égaux pour les deux simulations tests, mais différents de celui de la simulation témoin. Cette différence provient de la légère différence de distance parcourue puisque l'on voit aux Figure 3.11 et Figure 3.12 que les écarts par rapport à la simulation témoin apparaissent au même instant de la simulation pour la distance parcourue et l'estimation d'émissions de CO₂. On remarque aussi, sur la Figure 3.11, que les variations sont exactement identiques entre les deux simulations tests et légèrement différentes de celle témoin. Cette différence est sûrement due à une légère erreur de manipulation des modèles plus qu'à une différence de calcul des émissions par AIMSUN dû à la variation de poids.

On peut donc considérer que le paramètre de poids modifié seul n'a pas d'impact sur les émissions de CO₂ des modèles environnementaux d'AIMSUN.

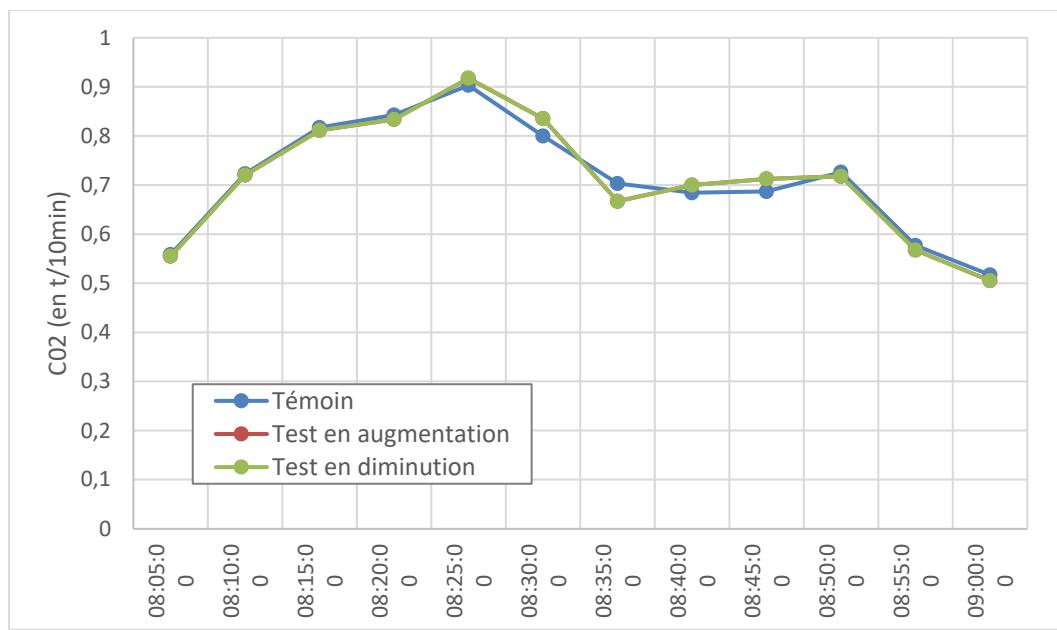


Figure 3.11 Émissions de CO₂ des voitures calculées par le modèle de consommation de carburant pour les tests de l'analyse de sensibilité du poids des véhicules

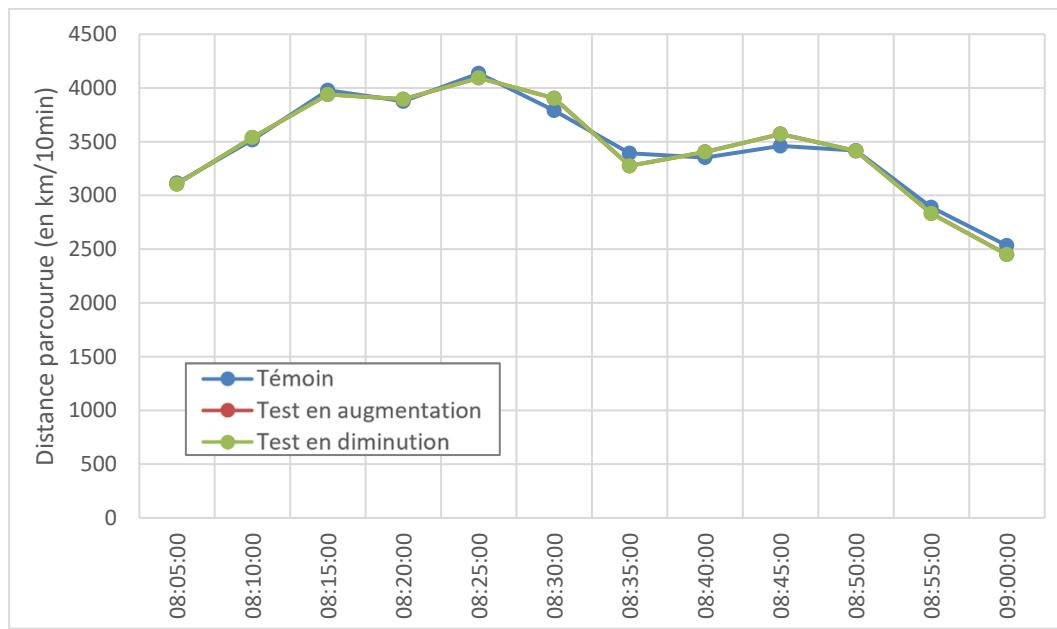


Figure 3.12 Distances parcourues par les voitures sortis des simulations de l'analyse de sensibilité du poids des véhicules

3.3.1.3 Test des paramètres d'accélération et de décélération des véhicules

Les deux tests comparés ici à la simulation témoin sont celui avec les paramètres d'accélération et de décélération des véhicules augmentés de 50 % (test en augmentation) et les paramètres d'accélération et de décélération des véhicules diminués de 50 % (test en diminution) par rapport à ceux par défaut de la simulation témoin. Les paramètres modifiés sont l'accélération et la décélération maximale ainsi que la décélération normale afin de représenter un conducteur plus ou moins agressif. Pour ces trois paramètres, les valeurs de maximum et minimum sont aussi augmentées ou diminuées de 50 %. Le Tableau 3.8 résume les pourcentages de différence obtenus entre les résultats de la simulation test et celle témoin par rapport à celle témoin (voir équation (2.4)). Les pourcentages sont bleus lorsque le résultat de la simulation test est plus petit que celui de la simulation témoin et orange à l'inverse.

Tableau 3.8 Résultats de l'analyse de sensibilité des paramètres d'accélération et de décélération des véhicules dans AIMSUN

AU TOTAL SUR TOUTE LA SIMULATION			
Test en :	Comptage en entrée	Distance parcourue	
Augmentation	0,00 %	- 0,14 %	
Diminution	0,00 %	- 1,53 %	
Test en :	LEM	Panis	Consommation de carburant
Augmentation	- 0,47 %	+ 7,90 %	+ 14,66 %
Diminution	+ 4,02 %	+ 0,98 %	- 12,09 %
À L'INSTANT FINAL DE LA SIMULATION			
Test en :	LEM	Panis	Consommation de carburant
Augmentation	+ 2,99 %	+ 10,56 %	+ 18,87 %
Diminution	+ 31,54 %	+ 32,55 %	+ 14,73 %

Malgré un nombre de véhicules entrants identique, les simulations tests ont toutes des distances parcourues légèrement inférieures à celle de la simulation témoin. La différence de km parcourus n'est cependant pas très marquée et n'influence pas beaucoup les émissions de CO₂. Une partie du Tableau 3.8 a été refaite en ANNEXE IV en calculant les émissions par km parcourus. Les pourcentages de différence qui y sont trouvés sont sensiblement les mêmes.

En revanche, concernant les inventaires d'émissions, la différence avec la simulation témoin est plus importante en particulier pour le modèle de consommation de carburant. On ne retrouve pas de logique de proportionnalité entre les émissions calculées par les modèles et les valeurs des paramètres d'accélération et de décélération à partir des résultats d'inventaire sur la simulation complète.

Concernant les émissions au dernier instant de la simulation, pour les modèles de LEM et de Panis, il est très clair que ce sont les véhicules étant les moins agressifs (test en diminution) qui consomment le plus (autour de + 30 % par rapport à la simulation témoin). Pour le modèle de consommation de carburant, les résultats en augmentation et en diminution sont très proches et au-dessus de celui du test témoin. Avec l'évolution des émissions calculées au cours des simulations sur les Figure 3.13, Figure 3.14 et Figure 3.15, au début des simulations, les émissions de CO₂ sont proportionnelles à l'agressivité des conducteurs puisqu'on retrouve dans l'ordre les émissions du test en augmentation, du test témoin puis du test en diminution. Seulement, à partir d'un certain point, diffèrent pour chacun des modèles environnementaux, c'est le test en diminution qui passe au-dessus des deux autres excepté pour le modèle de consommation de carburant où il dépasse celui témoin et arrive à peu près à la même valeur que celui en augmentation à l'instant final. De plus, pour les trois modèles environnementaux, les tests en augmentation et témoin ont des tendances très similaires et gardent un écart relativement constant au cours des simulations. Pour LEM, les fortes accélérations et décélérations des conducteurs ne semblent pas avoir beaucoup d'impact sur les émissions, ce qui paraît logique puisque le calcul d'émissions est fait à l'échelle méso à partir de vitesses moyennes. En revanche, pour les deux modèles d'échelle micro, le modèle de Panis et celui de consommation de carburant, il est très clair que l'agressivité des conducteurs augmente leurs émissions de CO₂. Pour le test en diminution maintenant, il semblerait que l'accélération et la décélération des véhicules aient été tellement diminuées qu'ils mettent plus de temps à effectuer leur trajet (voir Figure 3.16), ce qui augmente leurs émissions. Vers la fin de la modélisation, la circulation se fluidifie, mais cette fluidification s'effectue plus lentement dans le modèle en diminution puisque les véhicules sont moins réactifs. On peut le voir sur la Figure 3.17 qui représentent les vitesses moyennes dans les trois simulations. En fin de simulation, pour le test en augmentation et celui témoin, la vitesse moyenne augmente au dernier instant

de la simulation ce qui montre bien la fluidification du trafic. Ce n'est pas le cas pour le test en diminution pour lequel la vitesse moyenne reste la même au dernier instant de la simulation. À la fin de la modélisation, il y a encore presque trois fois plus de véhicules dans la simulation en diminution que dans celles témoin ou celle en augmentation. Tout au long de la modélisation, le test en diminution enregistre des vitesses moyennes nettement inférieures à celles des tests en augmentation et témoin qui sont, eux, sensiblement identiques.

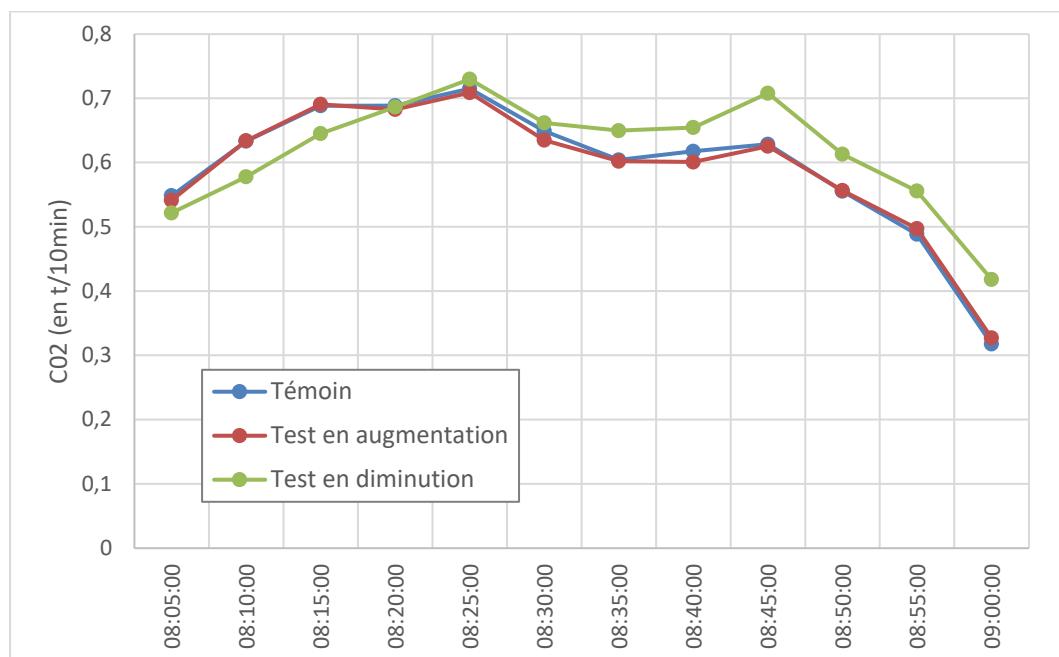


Figure 3.13 Émissions de CO₂ des voitures calculées par le modèle de LEM pour les tests de l'analyse de sensibilité des paramètres d'accélération et de déclaration des véhicules

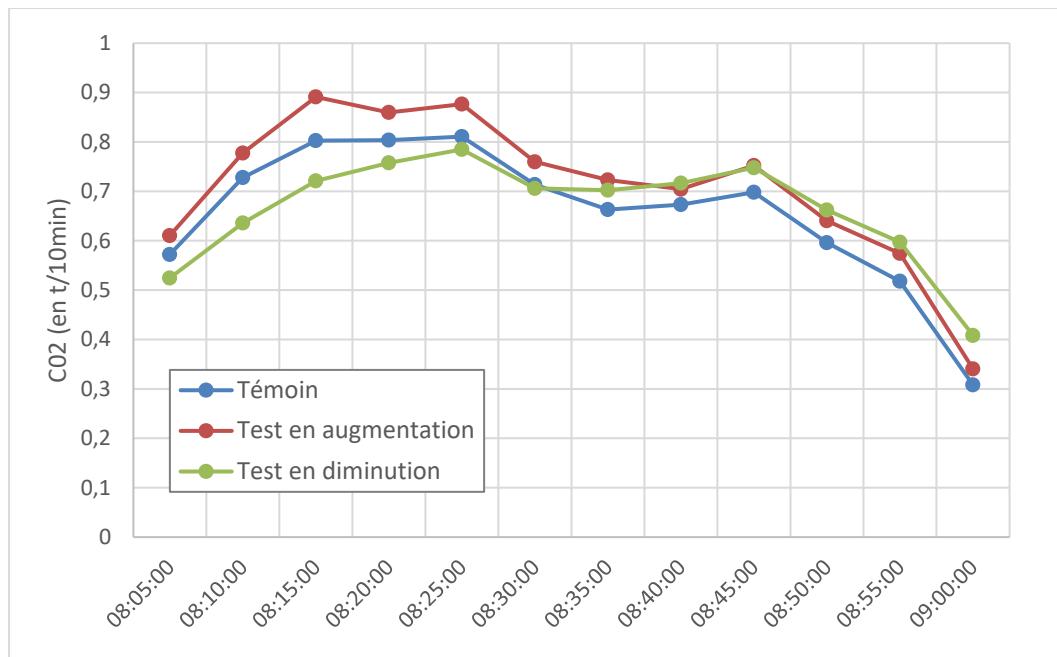


Figure 3.14 Émissions de CO₂ des voitures calculées par le modèle de Panis pour les tests de l'analyse de sensibilité des paramètres d'accélération et de déclaration des véhicules

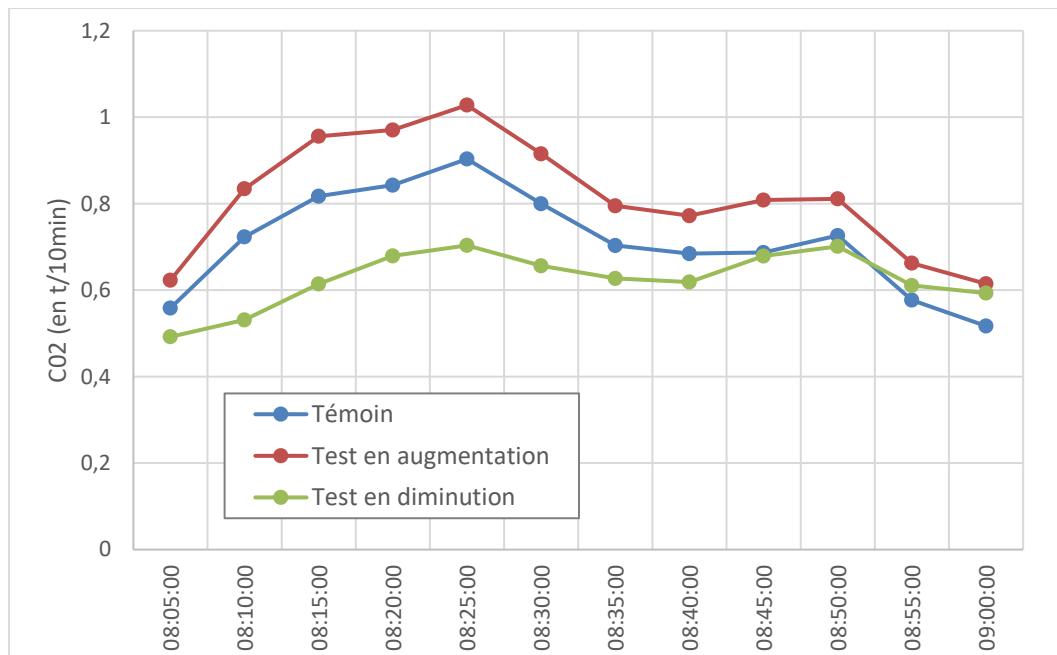


Figure 3.15 Émissions de CO₂ des voitures calculées par le modèle de consommation de carburant pour les tests de l'analyse de sensibilité des paramètres d'accélération et de déclaration des véhicules

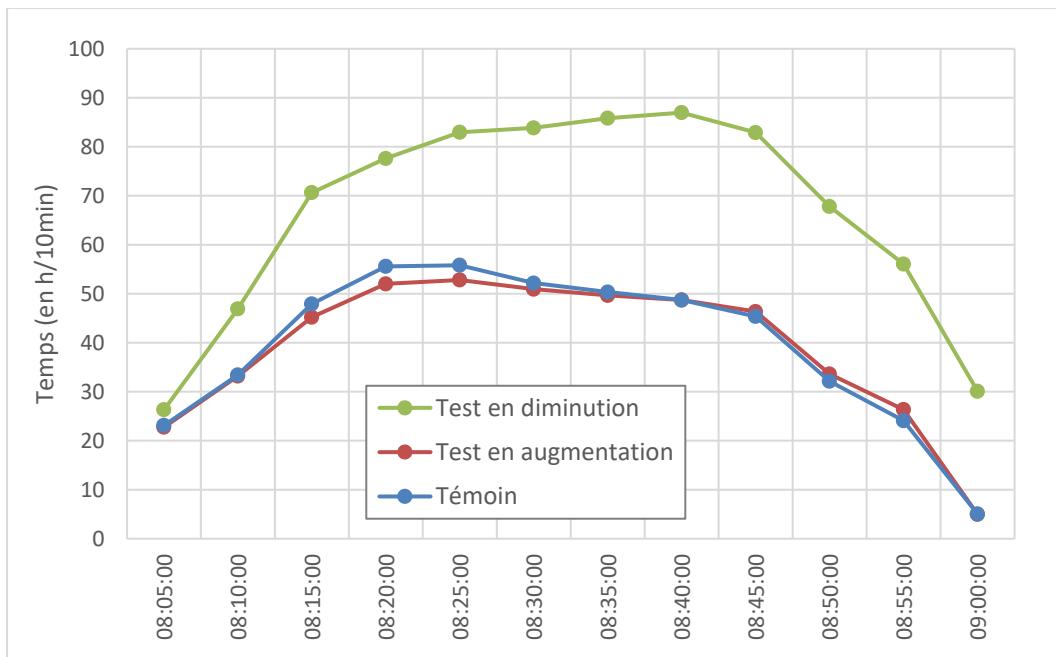


Figure 3.16 Temps de parcours total des voitures à l'intérieur des simulations de l'analyse de sensibilité des paramètres d'accélération et de décélération des véhicules

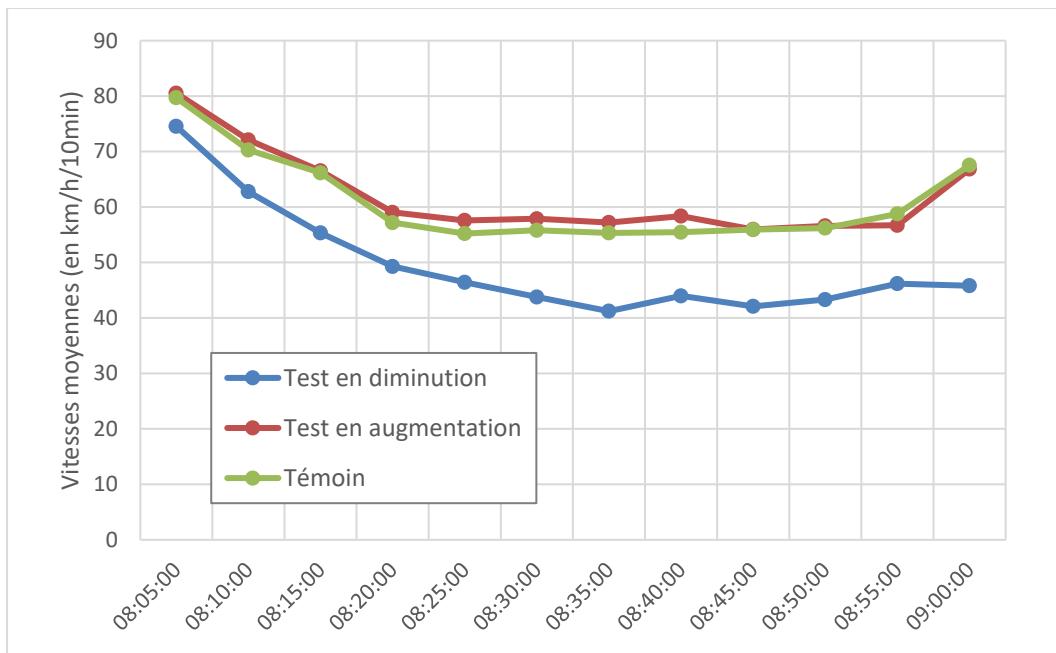


Figure 3.17 Vitesses moyennes des voitures de l'analyse de sensibilité des paramètres d'accélération et de décélération des véhicules

Finalement, les paramètres d'accélération et de décélération des véhicules ont un fort impact sur les émissions de CO₂ de ceux-ci surtout pour les modèles environnementaux d'échelle microscopique. Pour un trajet identique et de relativement même temps, si un conducteur est 1,5 fois plus agressif dans ses accélérations et décélérations, ses émissions seront entre 7,9 % (Panis) et 14,7 % (consommation de carburant) plus élevées. S'il est plus lent dans ses accélérations et décélérations, son temps de trajet sera augmenté, mais les résultats précédents ne permettent pas de conclure l'impact sur les émissions. En effet, cela diminue les émissions lors des accélérations et décélérations des véhicules, mais les congestions mettant aussi plus de temps à se fluidifier, les véhicules sont bloqués à l'arrêt plus longtemps. En fonction des modèles de calcul, Panis et consommation de carburant, les résultats d'inventaire sont alors différents.

3.3.1.4 Bilan de l'analyse de sensibilité

Le Tableau 3.9 résume les résultats précédents : seules les dimensions des véhicules et leurs paramètres d'accélération et de décélération ont un impact sur leurs émissions de CO₂ calculées par AIMSUN. Il n'est donc pas nécessaire d'adapter le poids des véhicules au parc de véhicules montréalais. Concernant la longueur des véhicules, l'impact sur l'inventaire global des simulations reste assez faible malgré la forte modification appliquée, il est notable simplement en fin de simulation, lorsque la circulation se fluidifie. Il pourrait être important de l'adapter si la modélisation était plus longue ou s'il y avait beaucoup de congestion puis de fluidification. Comme attendu au vu de la revue de littérature, l'impact des paramètres d'accélération et de décélération est le plus important avec plus de 10 % de différence avec la simulation témoin pour une agressivité augmentée de 50 %. Malgré le fait que ces valeurs soient difficiles à adapter aux conditions montréalaises, si l'attitude des conducteurs est vraiment différente des paramètres par défaut d'AIMSUN, cela pourrait avoir un impact conséquent sur les inventaires d'émissions de CO₂.

Tableau 3.9 Bilan des résultats de l'analyse de sensibilité des paramètres généraux des véhicules d'AIMSUN

Impact sur les émissions par rapport à la simulation témoin		
Dimension des véhicules	+/- 2 %	AU TOTAL
	- 22 % à + 35 %	À L'INSTANT FINAL
Poids	< 1 %	AU TOTAL
Accélération et décélération	- 12 % à + 15 %	AU TOTAL
	+ 3 % à + 32 %	À L'INSTANT FINAL

Depuis que l'étude a été faite, le manuel d'utilisateur d'AIMSUN a été mis à jour. Dans sa nouvelle version (AIMSUN Next Users Manual, s. d. f; AIMSUN Next Users Manual, s. d. c), ils y expliquent que le poids sert uniquement au calcul des émissions dans le modèle de LEM pour les camions (*Large Goods Véhicule* ou *Heavy Goods Vehicle*). Les résultats de l'analyse de sensibilité du poids des véhicules sont donc cohérents avec les nouvelles informations données par le manuel d'utilisation du logiciel.

3.3.2 Analyse de sensibilité du paramétrage du modèle de consommation de carburant d'AIMSUN

Les cinq types de paramètres du modèle de consommation de carburant ont été testés ici en augmentation et en diminution de 15 %. Cette valeur de 15 % a été fixée arbitrairement afin d'identifier celui ou ceux qu'il serait le plus important d'adapter au parc de véhicules de Montréal.

Comme expliqué en 1.3.2.1, ce modèle environnemental d'AIMSUN s'appuie sur le mode de déplacement du véhicule pour calculer sa consommation. Ces quatre modes de déplacement sont l'arrêt, la vitesse constante, l'accélération et la décélération. À l'aide de la base de données de sortie de la simulation témoin, il a été possible d'identifier le profil de vitesse des voitures de la simulation et ainsi voir dans quel mode elles passent le plus de temps. Ces résultats sont présentés en Tableau 3.10.

Tableau 3.10 Profil de vitesse des voitures de la modélisation d'Innsbruck 2015

Mode de déplacement	Pourcentage du temps
Arrêt	14,22 %
Vitesse constante	57,51 %
Accélération	15,77 %
Décélération	12,51 %

Le mode dans lequel les véhicules passent le plus de temps est la vitesse constante. On retrouve assez loin derrière (environ 4 fois moins de temps) l'accélération, l'arrêt, et enfin la décélération.

3.3.2.1 Paramètre de consommation de carburant à l'arrêt

D'après le Tableau 3.11, dans l'ordre décroissant des consommations de carburant estimées, on retrouve le test en augmentation, le test témoin, et le test en diminution. Si l'on augmente ou diminue le paramètre de consommation à l'arrêt de 15 %, la variation de la consommation de carburant est identique. La consommation de carburant des véhicules semble donc être proportionnelle au paramètre de consommation à l'arrêt, mais l'impact sur la consommation totale durant la simulation est relativement faible.

Tableau 3.11 Résultats de l'analyse de sensibilité du paramètre de consommation à l'arrêt du modèle de consommation de carburant d'AIMSUN

	Pourcentage de différence de consommation de carburant calculé par rapport au test témoin
Test en augmentation	+ 0,5 %
Test en diminution	- 0,5 %

Au cours de la simulation, les consommations de carburant estimées sont relativement proches et les tendances sont exactement similaires comme le montre la Figure 3.18.

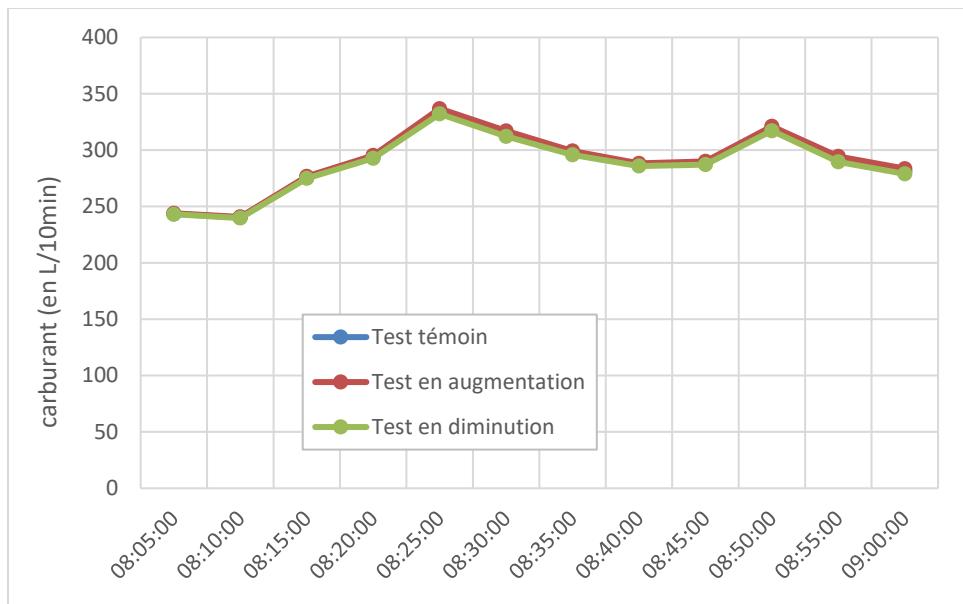


Figure 3.18 Variation de la consommation de carburant au cours des simulations testant la sensibilité du paramètre de consommation à l'arrêt

3.3.2.2 Paramètre de consommation de carburant à la décélération

D'après le Tableau 3.12, dans l'ordre décroissant des consommations de carburant estimées, on retrouve le test en augmentation, le test témoin, et le test en diminution. Si l'on augmente ou diminue le paramètre de consommation à la décélération de 15 %, la variation de la consommation de carburant est identique. La consommation de carburant des véhicules semble donc être proportionnelle au paramètre de consommation à la décélération, mais l'impact sur la consommation totale durant la simulation est relativement faible.

Tableau 3.12 Résultats de l'analyse de sensibilité du paramètre de consommation à la décélération du modèle de consommation de carburant d'AIMSUN

	Pourcentage de différence de consommation de carburant calculé par rapport au test témoin
Test en augmentation	+ 0,7 %
Test en diminution	- 0,7 %

Au cours de la simulation, les consommations de carburant estimées sont très proches et les tendances sont exactement similaires, comme le montre la Figure 3.19.

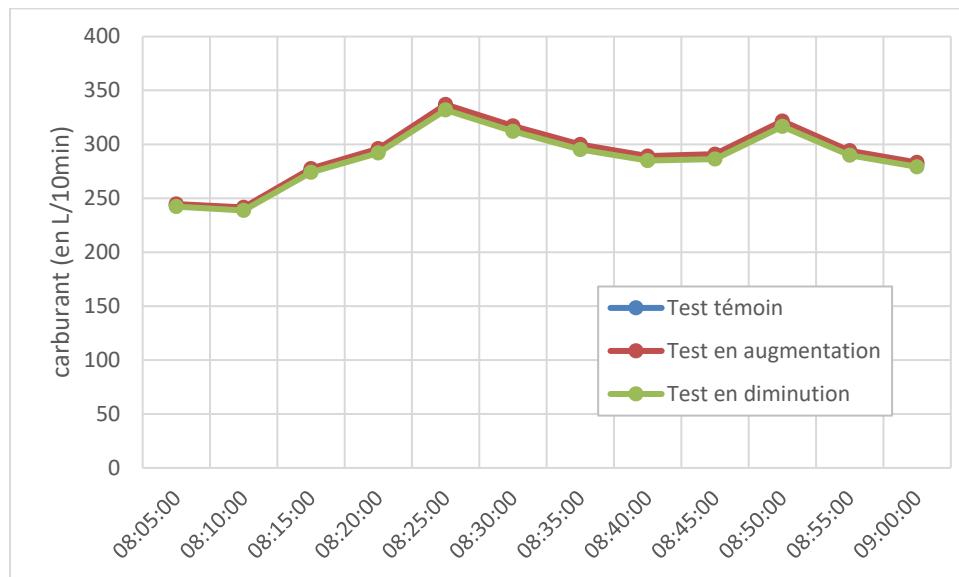


Figure 3.19 Variation de la consommation de carburant au cours des simulations testant la sensibilité du paramètre de consommation à la décélération

3.3.2.3 Paramètres de consommation de carburant à vitesse constante

D'après le Tableau 3.13, dans l'ordre décroissant des consommations de carburant estimées, on retrouve le test en augmentation, le test témoin, et le test en diminution. Si l'on augmente ou diminue les paramètres de consommation à vitesse constante de 15 %, la variation de la consommation de carburant est identique. La consommation de carburant des véhicules semble donc être proportionnelle aux paramètres de consommation à vitesse constante.

Tableau 3.13 Résultats de l'analyse de sensibilité des paramètres de consommation à vitesse constante du modèle de consommation de carburant d'AIMSUN

Pourcentage de différence de consommation de carburant calculé par rapport au test témoin	
Test en augmentation	+ 6,7 %
Test en diminution	- 6,7 %

Au cours de la simulation, les consommations de carburant estimées gardent un écart identique et constant, et les tendances sont exactement similaires, comme le montre la Figure 3.20.

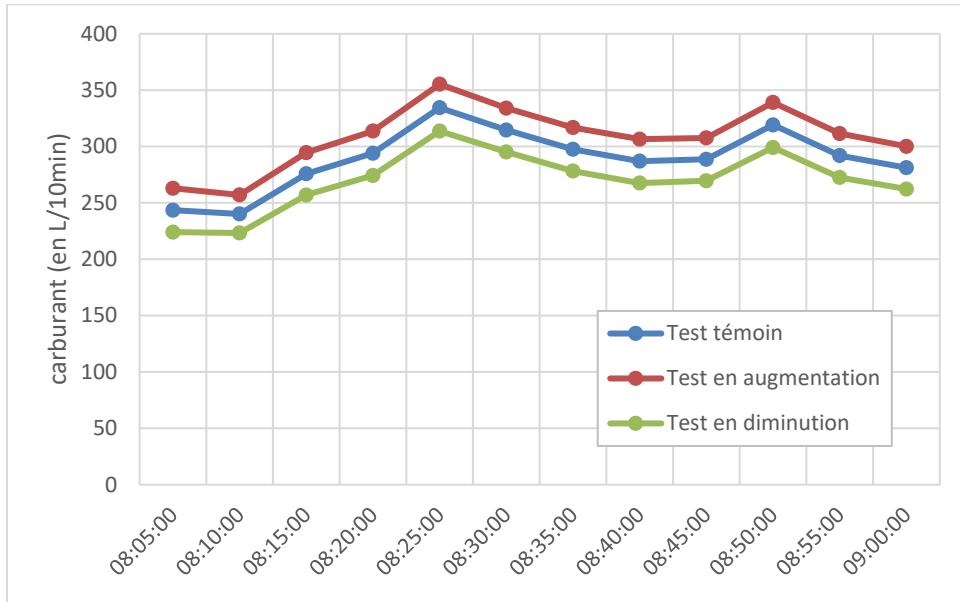


Figure 3.20 Variation de la consommation de carburant au cours des simulations testant la sensibilité des paramètres de consommation à vitesse constante

3.3.2.4 Paramètre de vitesse de consommation de carburant minimale à vitesse constante

D'après le Tableau 3.14, dans l'ordre décroissant des consommations de carburant estimées, on retrouve le test en augmentation, le test témoin, et le test en diminution. La variation de la consommation de carburant est plus importante si l'on augmente la vitesse de consommation minimale de 15 % que si on la diminue d'autant. La consommation de carburant semble donc suivre la même tendance que le paramètre de vitesse de consommation de carburant minimale à vitesse constante, mais de manière non proportionnelle.

Tableau 3.14 Résultats de l'analyse de sensibilité du paramètre de vitesse de consommation minimale à vitesse constante du modèle de consommation de carburant d'AIMSUN

Pourcentage de différence de consommation de carburant calculé par rapport au test témoin	
Test en augmentation	+ 5,4 %
Test en diminution	- 3,6 %

Comme le montre la Figure 3.21, au cours de la simulation, les écarts entre les estimations de consommation de carburants se creusent pour atteindre un maximum, à la fin de la simulation, de + 7,3 % d'écart entre le test en augmentation et le test témoin, et de - 4,8 % entre le test de diminution et le test témoin.

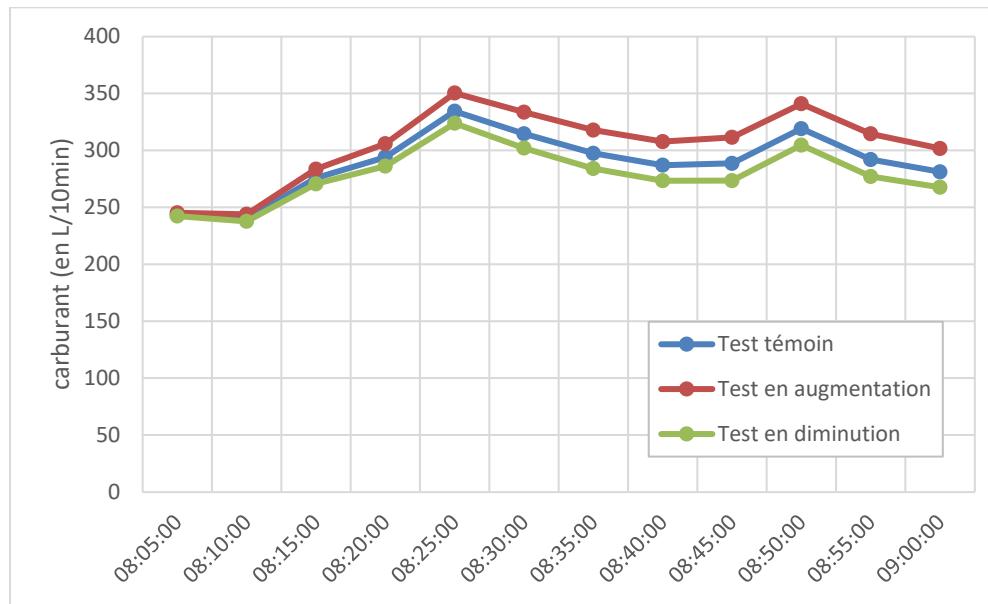


Figure 3.21 Variation de la consommation de carburant au cours des simulations testant la sensibilité de la vitesse de consommation de carburant minimale à vitesse constante

3.3.2.5 Paramètres de consommation de carburant à l'accélération

D'après le Tableau 3.15, dans l'ordre décroissant des consommations de carburant estimées, on retrouve le test en augmentation, le test témoin, et le test en diminution. Si l'on augmente ou diminue les paramètres de consommation à l'accélération de 15 %, la variation de la

consommation de carburant est identique. La consommation de carburant des véhicules semble donc être proportionnelle aux paramètres de consommation à l'accélération.

Tableau 3.15 Résultats de l'analyse de sensibilité des paramètres de consommation à l'accélération du modèle de consommation de carburant d'AIMSUN

	Pourcentage de différence de consommation de carburant calculé par rapport au test témoin
Test en augmentation	+ 7,1 %
Test en diminution	- 7,1 %

Au cours de la simulation, les consommations de carburant estimées gardent un écart identique et les tendances sont exactement similaires, comme le montre la Figure 3.22.

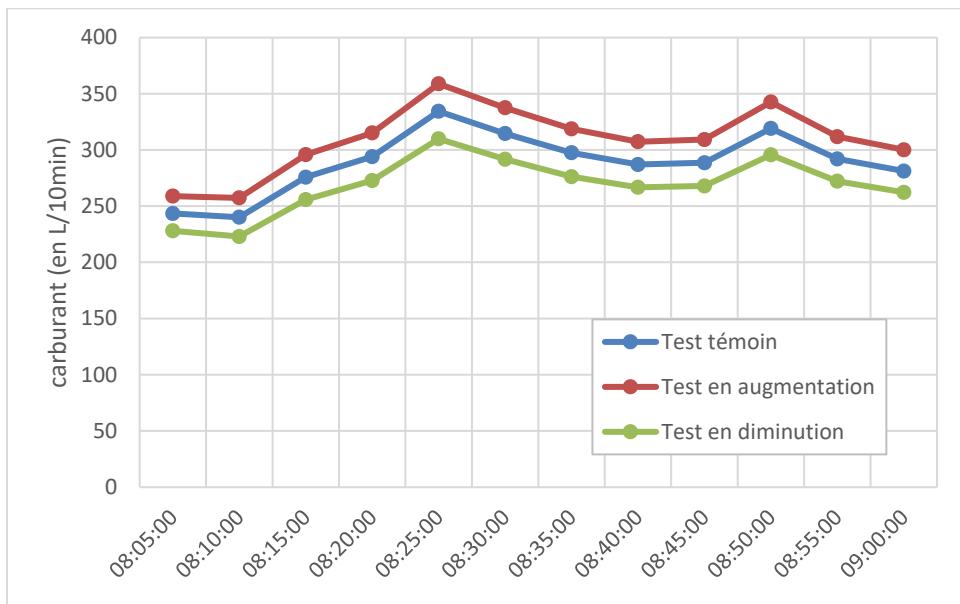


Figure 3.22 Variation de la consommation de carburant au cours des simulations testant la sensibilité des paramètres de consommation à l'accélération

3.3.2.6 Bilan de l'analyse de sensibilité

Les cinq types de paramètres du modèle de consommation de carburant d'AIMSUN ont été testés, en augmentation et diminution de 15 %, et une modélisation témoin a été utilisée pour les comparer. La modification des paramètres entraîne des différences de résultats de consommation des véhicules qui sont résumés en Tableau 3.16. Il a été vérifié, en relevant les valeurs de comptage en entrée des simulations, que celles-ci modélisaient bien les mêmes déplacements. La différence de consommation de carburant entre les tests vient donc bien du changement dans les paramètres du modèle de consommation de carburant.

Tableau 3.16 Bilan des résultats de l'analyse de sensibilité des paramètres du modèle de consommation de carburant d'AIMSUN

	<i>Impact sur la consommation de carburant par rapport au test témoin</i>
Paramètre à l'arrêt	+/- 0,5 %
Paramètre à la décélération	+/- 0,7 %
Paramètres à vitesse constante	+/- 6,7 %
Paramètre de vitesse de consommation minimale à vitesse constante	- 3,6 % à + 5,4 %
Paramètres d'accélération	+/- 7,1 %

Tout d'abord, les consommations de carburant calculées sont toujours proportionnelles à la valeur des paramètres analysés. La modification des valeurs de consommation à l'arrêt et à la décélération n'a que très peu d'impact sur le calcul de la consommation de carburant des véhicules et donc de leurs émissions. Ce sont les paramètres de consommation à l'accélération qui ont le plus d'impact sur les consommations de carburant juste devant ceux à vitesse constante. En comparant ces résultats au profil de vitesse en Tableau 3.10, on peut dire qu'il n'y a pas de lien évident entre le temps que passent les véhicules dans les différents modes de déplacement et l'impact de leurs paramètres sur l'estimation de consommation de carburant.

Finalement, il serait intéressant d'adapter les paramètres d'accélérations et les deux types de paramètres de déplacement à vitesse constante dans une modélisation plus précise des émissions des véhicules de Montréal.

3.3.3 Adaptation du paramétrage de MOVES à Montréal

La première modélisation de MOVES utilisée est celle décrite en 2.2.2 permettant de comparer ses résultats avec ceux des modèles environnementaux d'AIMSUN. Dans cette première modélisation, le parc de véhicules modélisé est donc composé uniquement de voitures à essence de 12 ans afin de représenter la Ford Fiesta d'AIMSUN décrite en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et de 2010 pour correspondre aux données du modèle de Panis. De plus, les données météorologiques ont été laissées par défaut, correspondant à celle du *Grand Isle County*, pour un gain de temps pour la première modélisation. Cependant, il est possible de mieux adapter le paramétrage de MOVES aux conditions de Montréal : c'est le but de cette seconde modélisation. Pour cela, la base de données de la SAAQ de 2018 a été utilisée afin de connaître la répartition de l'âge et du carburant des véhicules de Montréal (SAAQ, 2018). Les données météorologiques historiques du site climat.meteo.gc.ca ont permis d'avoir la température et le taux d'humidité moyens de Montréal (Gouvernement du Canada, 2022).

Au total, quatre simulations ont été réalisées et comparées à la première modélisation MOVES décrite en 2.2.2 : la première simulation avec seulement l'adaptation de l'âge des véhicules, la deuxième seulement avec l'adaptation du carburant des véhicules, la troisième seulement avec les données météorologiques, et la dernière avec les trois adaptations en même temps. Le but est alors de voir quels paramètres de la base de données d'entrée de MOVES sont les plus importants à adapter à la situation de Montréal si MOVES est choisi pour le projet de carte carbone. Les résultats de ces comparaisons sont présentés en Tableau 3.17.

Tableau 3.17 Bilan des résultats de l'analyse de l'impact de l'adaptation des paramètres de MOVES à Montréal par rapport à la première modélisation MOVES

	<i>Impact sur l'inventaire d'émissions par rapport à la première modélisation MOVES</i>
Adaptation de l'âge des véhicules	- 10 %
Adaptation du carburant des véhicules	+ 0,1 %
Adaptation de données météorologiques	- 0,1 %
Modélisation adaptée à Montréal (combinaison des trois modifications)	- 12 %

La seule adaptation à Montréal qui fait augmenter les émissions de CO₂ par rapport aux résultats de la première modélisation MOVES est l'adaptation du carburant utilisé par les véhicules (+ 0,1 %). Tout comme celui de l'adaptation des données météorologiques, l'impact de l'adaptation du carburant des véhicules semble être négligeable ici. Cependant, pour être certains de l'impact de l'adaptation des données météorologique, il faudrait refaire l'expérience durant d'autres saisons de l'années où la différence de température entre Montréal et *Grand Isle County* serait plus importante.

L'adaptation des fractions de véhicules par âge est plus impactant et fait baisser les émissions de CO₂ de 10 % environ. En réalité, comme le montre la Figure 3.23, à Montréal, il y a nettement plus de véhicules récents (43,3 % des modèles de véhicules ont cinq ans ou moins) consommant souvent moins que des véhicules de 12 ans. Les véhicules considérés sont les automobiles et les camions légers ce qui comprend les VUS et les pick-up de plus en plus nombreux ces dernières années.

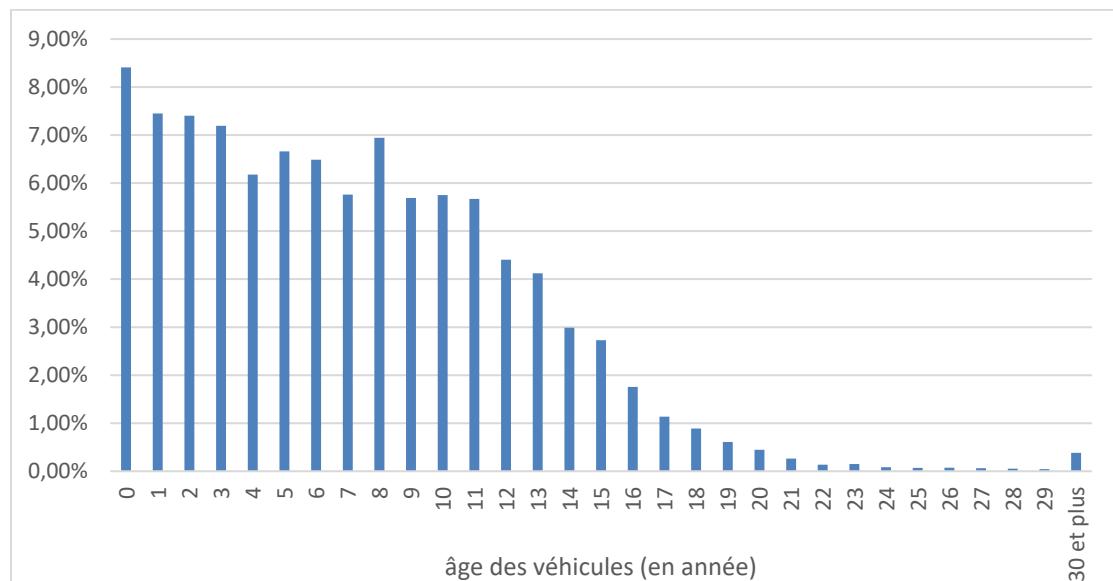


Figure 3.23 Répartition de l'âge des véhicules (automobiles et camions légers) à Montréal en 2018 à partir de l'année du modèle de la base de données de la SAAQ

Finalement, les émissions de CO₂ diminuent de 12 % (- 8 300 kg de CO₂) en adaptant les paramètres de MOVES à Montréal par rapport à la première modélisation MOVES dont les résultats d'inventaires sont comparables à ceux d'AIMSUN.

Le paramètre de MOVES ayant le plus d'impact sur les émissions est l'âge des véhicules. Il est important de remarquer qu'il n'est pas possible de changer l'âge des véhicules dans AIMSUN, ce qui doit certainement causer des surestimations d'émissions, par exemple, pour le modèle de Panis dont le parc de véhicule date de 2010.

CHAPITRE 4

DISCUSSION

Le but de ce mémoire était de tester et de comparer différentes méthodes d'estimation des émissions de CO₂ du transport routier afin de faire des recommandations pour la carte carbone. Le premier objectif était de trouver des sources de données, dont la modélisation de la circulation du SUM sur le logiciel AIMSUN, et de voir dans quelles mesures elles pourront être exploitées pour le projet de carte carbone. Le deuxième objectif était d'étudier dans quelles mesures il était possible de coupler la modélisation de trafic d'AIMSUN avec les modèles environnementaux implantés dans AIMSUN et avec le logiciel de d'estimation d'émissions de GES, MOVES. Le dernier objectif était d'étudier la sensibilité de ces modèles à leur paramétrage.

Dans ce chapitre, tout d'abord, un bilan des principaux résultats et interprétations décrits au CHAPITRE 3 est dressé. À la lumière de la revue de littérature exposée au CHAPITRE 1, les limites de ces résultats sont abordées. Il finit par quelques recommandations pour les futures études de la modélisation des émissions de CO₂ du transport routier pour la carte carbone de Montréal. Dans ces trois prochains paragraphes, trois axes de réflexion sont abordés toujours dans le même ordre. Le premier point traite de la modélisation de la circulation, le deuxième de la modélisation et des estimations des émissions de CO₂, et le dernier du paramétrage des modélisations.

4.1 Opérationnalisation des résultats

D'après le CHAPITRE 3 sur les résultats et les interprétations, les commentaires suivants sont formulés.

Afin d'utiliser les modèles environnementaux d'AIMSUN, il a été nécessaire de modifier la modélisation méso DUE initiale en une nouvelle modélisation micro SRC. Cela nécessite plus

de moyens et de temps de calcul puisque la simulation méso DUE de base du SUM prenait environ 10 minutes à tourner, alors que celle micro SRC prend au moins 1 heure de simulation. Les principales différences observées dans les résultats de ces deux modélisations proviennent du changement d'échelle et non pas du changement de méthode d'affectation des chemins. Au niveau des émissions, il y a une différence de 6 % entre les inventaires de la modélisation méso DUE de la ville et celui de la modélisation micro SRC créée ici, ce qui est assez faible. La modélisation micro SRC est donc acceptable et on peut considérer que cette modification n'influence pas ou peu la comparaison des méthodologies d'estimation d'émissions faites par la suite. Seulement, cette nouvelle modélisation micro SRC n'a pas été calibrée. Comme il a été vu en revue de littérature en 1.3.3, la calibration est importante et l'étude Anya et al. (2014) démontre une différence d'émissions de CO₂ de 16 % entre les résultats d'AIMSUN non calibrés et les données empiriques. Il y a donc une incertitude sur les résultats d'émissions calculés avec la nouvelle modélisation AIMSUN de l'ordre de 15 à 20 % due à la modélisation de la circulation.

À partir de cette modélisation de trafic, des inventaires d'émissions de CO₂ ont été calculés avec les modèles environnementaux d'AIMSUN et le logiciel MOVES. Entre les trois modèles environnementaux et MOVES, c'est l'estimation d'émissions MOVES qui est la plus élevée (de + 2,2 % par rapport aux modèles micro à + 16,2 % par rapport au modèle méso LEM). Cependant, l'inventaire MOVES prend en compte plus de phénomènes d'émissions que ceux d'AIMSUN (préchauffage du moteur, utilisation d'accessoires...). En supprimant l'effet des phénomènes d'émissions supplémentaires dans MOVES, soit 11,5 % de l'inventaire MOVES, on obtient donc que ce sont les modèles environnementaux à l'échelle micro (Panis et consommation de carburant) d'AIMSUN qui estiment le plus d'émissions que ceux méso d'AIMSUN et de MOVES. Il est possible que les modèles environnementaux d'AIMSUN prennent en compte ces phénomènes directement au travers de leurs facteurs d'émissions sans les différencier de ceux liés à la puissance nécessaire au moteur. Si ça n'est pas le cas, il y a donc une incertitude de 10 à 15 % sur les inventaires d'AIMSUN, car ces modèles ne tiennent pas compte de tous les phénomènes d'émissions. Finalement, entre les quatre modèles d'émissions comparés ici, il serait intéressant de continuer soit avec celui de consommation de

carburant d'AIMSUN puisqu'il est à l'échelle micro et facilement paramétrable, soit avec celui de MOVES qui semble être plus précis.

Des analyses de sensibilité ont été conduites afin de voir quels paramètres seraient importants à calibrer afin de représenter au mieux les émissions du trafic à Montréal. D'après les résultats de ces analyses, pour la modélisation de la circulation, seuls les paramètres d'agressivité des véhicules seraient à calibrer, ce qui est cohérent avec les recommandations de la littérature disant que les paramètres les plus importants à calibrer étaient les « *Maximum desired speed* », « *Maximum desired acceleration* », et « *Normal deceleration* » (Anya et al., 2014. Madi, 2016). L'adaptation de ces paramètres permettrait de mieux représenter le parc de véhicule Montréalais. Pour les estimations d'émissions, dans AIMSUN, pour le modèle de consommation de carburant, ce sont les paramètres de consommation à vitesse constante et à l'accélération qui sont les plus importants à calibrer. Pour MOVES, c'est l'âge des véhicules qui est le plus important à adapter au parc de véhicule Montréalais.

4.2 Limites et perspectives

Que ce soit pour la modélisation de la circulation, des émissions ou de leur paramétrage, il faut prendre en compte certaines limites aux résultats précédents.

Concernant la modification de la modélisation de la circulation faite par le SUM, les différences ainsi que les incertitudes sur les émissions ne sont pas problématiques pour l'étude faite ici, car on compare les inventaires d'émissions entre eux. Cependant, elles seraient à prendre en compte dans le cadre d'une estimation d'émissions plus précise pour la carte carbone par exemple.

Les deux modèles de calcul d'émissions retenus sont ceux de consommation de carburant d'AIMSUN et celui de MOVES. Le modèle de consommation de carburant est facile à utiliser et il est rapide d'en voir les résultats puisqu'il est implémenté directement dans AIMSUN. De

plus, il permet d'avoir les émissions à haute résolution spatiale et temporelle: les émissions sont calculées pour l'ensemble des véhicules sur tous les segments de routes à chaque pas de temps de la modélisation, par exemple toutes les 10 minutes. En revanche, il serait nécessaire de créer différentes catégories de véhicules pour les voitures afin de mieux représenter le parc de véhicules montréalais. Il faudrait ensuite trouver les facteurs et paramètres d'émissions correspondant aux modèles de véhicule soit grâce à une base de données, soit en faisant des mesures d'émissions. Concernant le modèle d'émissions de MOVES, il détaille les phénomènes responsables des émissions et possède déjà, en interne, une base de données avec les facteurs d'émissions pour différents types de véhicules. Cependant, les émissions sont agrégées au mieux par heure de simulation et par type de route ou de véhicule. Si l'on voulait avoir une plus haute résolution pour les résultats d'émissions, il faudrait faire plusieurs modélisations MOVES différentes. De plus, la création d'une modélisation MOVES à partir de celle de trafic d'AIMSUN prend plus de temps que d'utiliser les modèles environnementaux implantés dans AIMSUN.

On a vu précédemment que différents paramètres devaient être adaptés aux conditions montréalaises dans le cadre de la carte carbone afin d'avoir des estimations d'émissions de CO₂ plus précises. Ceux-ci peuvent être difficiles à trouver et pourraient nécessiter de faire des mesures ou des relevés de données dans la réalité. Une démarche scientifique rigoureuse devrait alors être appliquée afin de ne pas créer de trop grosses incertitudes sur ces données se répercutant sur les inventaires d'émissions de CO₂. De plus, tous les paramètres d'AIMSUN et de MOVES n'ont pas été testés ici et pourraient avoir un impact sur les estimations d'émissions. Par exemple, la pente des routes est un facteur augmentant fortement les émissions de CO₂ des véhicules et n'est pas abordée ici. En outre, il a été conclu que, dans MOVES, l'impact des données météorologiques sur les résultats d'inventaire était assez faible. Cependant, dans sa thèse, Nouri (2016) démontre que les données météorologiques plus extrêmes (très chaudes ou très froides) ont plus d'impact que les températures moyennes ce qui n'a pas été testé ici.

4.3 Recommandations

À partir de ces résultats et de leurs limites, des recommandations ont été formulées.

Pour la modélisation de trafic, si les moyens le permettent, il serait recommandé de faire une modélisation micro DUE. Même si celle-ci était plus longue à calculer, elle serait intéressante, car cela créerait un trafic normalement plus proche de la réalité un jour de semaine classique à Montréal. De plus, afin d'avoir des résultats d'inventaire d'émissions précis, la modélisation micro devrait être calibrée, ce qui prend du temps. Cependant, comme il a été expliqué en revue de littérature, des nouvelles méthodes de calibration pour les modélisations de trafic micro à grande échelle sont en développement. Finalement, pour se défaire du problème de calibration, il serait possible d'utiliser la modélisation méso d'AIMSUN, mais seulement avec le modèle d'émissions de MOVES. Il serait donc moins précis qu'un modèle micro, mais profiterait de la calibration faite par le SUM sur la modélisation de trafic d'AIMSUN. Dans une future étude, la comparaison des inventaires MOVES faits à partir de la modélisation AIMSUN méso calibrée et micro non-calibrée pourrait permettre d'identifier l'incertitude liée à la calibration du modèle de trafic.

Pour le modèle d'estimation d'émissions, le choix se porte soit sur le modèle de consommation de carburant d'AIMSUN s'il est possible de trouver des données, soit sur MOVES si sa résolution spatiale et temporelle est suffisante pour la carte carbone. Pour aider dans le choix entre ces deux modélisations, il serait intéressant de vérifier si le modèle de consommation de carburant d'AIMSUN prend en compte les émissions liées à d'autres phénomènes que la puissance du moteur pour le déplacement du véhicule (préchauffage du moteur, utilisation d'accessoires...) directement au travers de leurs facteurs d'émissions. Les émissions liées à ces phénomènes représentant 11,5 % des émissions estimées par MOVES, cela serait une incertitude à ajouter aux résultats du modèle de consommation de carburant si ces phénomènes n'étaient pas pris en compte. Il serait aussi envisageable de créer une modélisation MOVES à l'échelle micro, seulement, cela demanderait des données supplémentaires sur le réseau et la circulation, ce qui prendrait alors plus de temps. Celle-ci ne pourrait être faite qu'à partir d'une

modélisation micro de la circulation sur AIMSUN. Une autre option envisageable serait d'automatiser le remplissage de la base de données pour MOVES à partir des résultats d'AIMSUN comme cela a déjà été fait d'après la littérature (Lin et al., 2011), ce qui rendrait l'utilisation de MOVES nettement plus simple et rapide.

Finalement, pour les données des modélisations de trafic et d'émissions, il serait intéressant de trouver les données adaptées à Montréal pour l'agressivité des conducteurs dans le modèle de trafic d'AIMSUN comme cela a été fait dans la thèse de Nouri (2016). Concernant les modèles d'émissions, celui de la consommation de carburant d'AIMSUN nécessite des données supplémentaires et celui de MOVES peut être fait à partir des données de la SAAQ. De plus, dans la nouvelle version du manuel d'utilisation d'AIMSUN, de nouveaux paramétrages ont été ajoutés pour le modèle de consommation de carburant, ce qui permettrait de préciser celui-ci dans un premier temps avant d'avoir des données adaptées à Montréal. Pour MOVES, il serait intéressant de tester l'impact des données météorologiques durant les autres saisons, entre autres, aux moments où les températures de Montréal sont plus extrêmes et plus éloignées de celles par défaut de MOVES correspondant au Grand Isle County.

CONCLUSION

La Chaire de recherche du Canada sur la mesure de l'impact des activités humaines sur les changements climatiques a pour but de développer une carte carbone. L'objectif de cette carte carbone est d'aider la ville de Montréal à respecter ses engagements de diminution d'émissions de GES. Celle-ci serait comme un jumeau numérique de la ville de Montréal avec des surcouches représentant les émissions de GES. C'est dans ce cadre qu'intervient cette étude dont le but est de comparer des méthodes et modèles d'estimation d'émissions de CO₂ pour le transport routier afin de fournir des recommandations pour la carte carbone.

Pour ce faire, un couplage a été effectué entre une modélisation de la circulation sur le logiciel AIMSUN fournie par le SUM avec des modèles d'estimations d'émissions. Tout d'abord, il a fallu étudier la modélisation de trafic d'AIMSUN. L'impact du passage de l'échelle méso à micro ainsi que de la méthode d'affectation des chemins DUE à celle SRC a été évalué. Ensuite, une comparaison des modèles environnementaux d'AIMSUN (LEM, Panis et al. (2006), et le modèle de consommation de carburant) a été conduite, à la fois entre eux, mais aussi avec l'inventaire du logiciel MOVES. Enfin, des analyses de sensibilité ont permis d'identifier les paramètres de ces modélisations qui seront les plus importants à calibrer dans le futur afin d'obtenir une modélisation représentative des émissions de la circulation routière à Montréal. Tout cela a permis de faire une comparaison globale des trois méthodologies d'estimation d'émissions de CO₂ du transport dans le but de les utiliser pour la carte carbone de Montréal.

Les principaux résultats qui ont découlé de cette étude sont les suivants. Concernant le changement d'échelle et de méthode d'affectation des chemins, son impact sur les résultats d'inventaires réside principalement dans la non-calibration de la nouvelle modélisation. En effet, le changement d'échelle affecte davantage les résultats que le changement de méthode d'affectation des chemins (+ 6 % d'émissions pour la modélisation micro SRC par rapport à celle méso DUE), mais sûrement moins que la non-calibration du modèle d'après la littérature. Une incertitude globale due à cette modification de modélisation est donc estimée à 15 à 20 %.

La comparaison des méthodologies d'inventaire d'émissions de CO₂ montre que c'est l'estimation d'émissions de MOVES qui est la plus élevée (de + 2,2 % par rapport aux deux modèles micro d'AIMSUN à + 16,2 % par rapport au modèle méso LEM). Cependant, il est à noter que MOVES prend en compte plus de phénomènes d'émissions de GES que les modèles AIMSUN a priori (11,5 % de l'inventaire MOVES provient du réchauffage moteur, de l'utilisation d'accessoires, ou déplacement à très faible vitesse pour le stationnement par exemple). En fin de compte, les analyses de sensibilité effectuées ici permettent d'identifier que, pour la modélisation de la circulation, seuls les paramètres d'agressivité des véhicules seraient à calibrer. Pour le modèle de consommation de carburant, ce sont les paramètres de consommation à vitesse constante et à l'accélération qui sont les plus importants à calibrer. Enfin, pour MOVES, c'est l'âge des véhicules qui est le plus important à adapter au parc de véhicule Montréalais. Ces analyses de sensibilité ne sont cependant pas exhaustives et il serait intéressant d'en faire de nouvelles (pour les conditions météorologiques par exemple) afin de pouvoir confirmer les conclusions trouvées ici.

Cette étude a permis d'identifier les avantages et inconvénients des différentes méthodes d'estimation d'émissions de CO₂ du transport routier à Montréal à partir de la modélisation de trafic AIMSUN du SUM. Il a été retenu que ce sont les modèles de consommation de carburant d'AIMSUN ou celui de MOVES qui seraient les plus intéressants à utiliser dans le futur pour la carte carbone. Néanmoins, leurs utilisations ont certains avantages et inconvénients, des recommandations sont formulées ensuite pour tenter d'y palier.

Le modèle de consommation de carburant d'AIMSUN a l'avantage d'être manipulable directement depuis le logiciel AIMSUN. Les résultats d'inventaires sont obtenus directement à la fin de la modélisation de la circulation et avec une fine précision permettant de connaître, à l'échelle micro, les émissions de chacun des véhicules sur chaque segment de route et à chaque pas de temps de la simulation (au choix, de l'ordre de 10 minutes par exemple). La résolution spatio-temporelle être donc plus fine que celle du modèle de MOVES. Dans l'optique d'une future utilisation pour la carte carbone, certaines modifications devraient cependant être appliquées. Concernant son paramétrage, il faudrait créer plusieurs catégories

de véhicules afin de mieux représenter l'hétérogénéité du parc de véhicules montréalais. Pour cela, il faudrait obtenir des données sur la consommation de carburant des véhicules montréalais qui pourraient être obtenus par des tests en laboratoire ou sur route par exemple. Cependant, une première adaptation du paramétrage des véhicules est dès maintenant possible puisque, dans la dernière version du manuel d'utilisation d'AIMSUN (AIMSUN Next Users Manual, s. d. c), quatre nouveaux paramétrages du modèle de consommation de carburant ont été ajoutés pour les voitures (mini à petites voitures, moyennes à grosses voitures, voitures de sport ou de luxe, et fourgonnettes), un pour les bus, un pour les camions et un dernier pour les motocyclettes. L'utilisation du Guide de consommation de carburant de Ressources naturelles Canada pourrait aussi être une piste pour l'adaptation du paramétrage. L'autre enjeu lié à l'utilisation de ce modèle d'estimation d'émissions est le fait que la modélisation de la circulation AIMSUN doit être à l'échelle micro, mais n'est pas calibrée. Il faudrait pouvoir estimer plus précisément l'impact de la non-calibration du modèle avant de l'utiliser pour la carte carbone. D'après le SUM, la calibration du modèle à l'échelle micro serait longue est il faudrait avoir des relevées de données de circulation pour la faire. Finalement, contrairement à MOVES, ce modèle ne permet pas de détailler la provenance des émissions des véhicules, c'est-à-dire qu'il n'est pas possible de distinguer les émissions liées aux différents phénomènes d'émissions. Les facteurs de consommation utilisés semblent représenter l'énergie nécessaire au déplacement du véhicule, mais il n'est pas précisé si ceux liés par exemple à l'utilisation d'accessoires ou au préchauffage du moteur sont aussi pris en compte. Ces deux dernières catégories, représentant 11,5 % des émissions dans l'inventaire de MOVES, pourraient donc être une nouvelle incertitude à ajouter aux estimations faites par ce modèle.

Le logiciel MOVES peut être utilisé pour le projet de carte carbone. Par rapport au modèle de consommation de carburant d'AIMSUN, MOVES à l'avantage d'être plus fiable et plus détaillé. En effet, plus de phénomènes d'émissions sont pris en compte et les facteurs d'émissions et de consommation d'énergie sont mis à jour régulièrement par l'USEPA. De plus, MOVES peut être paramétré, à l'échelle de modélisation utilisée ici (*county scale*), à partir de la modélisation de trafic méso d'AIMSUN. Il serait alors possible de s'affranchir de l'incertitude liée à la calibration de la modélisation de trafic puisque celle-ci serait faite par le

SUM. Cependant, afin d'avoir une résolution spatiale et temporelle compatible avec la carte carbone, il faudrait créer plusieurs modélisations MOVES, une pour chaque quartier ou segment de route par exemple. Sa résolution temporelle est elle aussi limitée puisque les résultats d'inventaires sont obtenus à l'heure près. La création de ces modélisations MOVES est relativement longue. Pour que cette solution soit concurrentielle avec celle du modèle de consommation de carburant, il faudrait automatiser la création de la base de données d'entrée de MOVES. Celle-ci permettrait de mettre en forme les données de la modélisation de trafic d'AIMSUN, celles de la SAAQ ainsi que les données météorologiques. Cette automatisation peut se faire au moyen de codage et de requêtes sur la base de données de sortie d'AIMSUN et il est envisageable que cette outil soit développé. En comparaison avec la limite majeure à l'utilisation du modèle de consommation de carburant d'AIMSUN, il serait plus rapide et plus simple de développer un outil de liaison entre AIMSUN et MOVES que de calibrer la modélisation de la circulation à l'échelle micro.

ANNEXE I

TABLEAUX 1 ET 2 ARTICLE INT PANIS ET AL., 2006

Tableau A I-1 Nombre de véhicules analysés adapté de Int Panis et al., 2006

Véhicule	Type	Carburant	Class-EURO	Mesures analysées
Toyota Yaris	Voiture	Essence	3	2634
Volkswagen Polo	Voiture	Essence	3	5461
Ford Escort	Voiture	Essence	1	11398
Toyota Corolla	Voiture	Essence	1	2517
Ford Fiesta	Voiture	Essence	1	13209
Opel Corsa	Voiture	Essence	1	12782
Renault Clio	Voiture	Essence	1	13194
Peugeot 205	Voiture	Essence	0	14055
Toyota Celica	Voiture	Essence	1	8704
Opel Astra	Voiture	Essence	1	9318
VW Golf	Voiture	Essence	1	10747
Renault Mégane	Voiture	Essence	2	11642
Skoda Octavia	Voiture	Diesel	3	4819
Alfa Romeo 156	Voiture	Diesel	2	2365
Citroën Jumper	Voiture	Diesel	3	10074
VW Golf	Voiture	Diesel	1	5302
Volvo 850	Voiture	Diesel	1	6831
Van Hool A600	Bus	Diesel	2	1154
MAN A12	Bus	Diesel	2	7803
MANA12	Bus	Diesel	2	5066
MANNL 202F	Bus	Diesel	1	9978
Van Hool A300D	Bus	Diesel	1	6654
Van Hool 3154	Bus	Diesel	2	5449
Iveco Eurocargo	Camion	Diesel	2	1638
Volvo FH12-420	Camion	Diesel	2	4514

Tableau A I-2 Fonction d'émissions pour les véhicules adapté de Int Panis et al., 2006

Polluant	Type de véhicule	E_0	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
CO ₂	Voiture essence	0	5,53e-01	1,61e-01	-2,89e-03	2,66e-01	5,11e-01	1,83e-01
	Voiture diesel	0	3,24e-01	8,59e-02	4,96e-03	-5,86e-02	4,48e-01	2,30e-01
	Voiture GPL	0	6,00e-01	2,19e-01	-7,74e-03	3,57e-01	5,14e-01	1,70e-01
	Véhicule utilitaire lourd (VUL)	0	1,52e+00	1,88e+00	-6,95e-02	4,71e+00	5,88e+00	2,09e+00
	Bus	0	9,04e-01	1,13e+00	-4,27e-02	2,81e+00	3,45e+00	1,22e+00
NO _x	Voiture essence ($a \geq -0,5 \text{ m/s}^2$)	0	6,19e-04	8,00e-05	-4,03e-06	-4,13e-04	3,80e-04	1,77e-04
	Voiture essence ($a < -0,5 \text{ m/s}^2$)	0	2,17e-04	0,00e+00	0,00e+00	0,00e+00	0,00e+00	0,00e+00
	Voiture diesel ($a \geq -0,5 \text{ m/s}^2$)	0	2,41e-03	-4,11e-04	6,73e-05	-3,07e-03	2,14e-03	1,50e-03
	Voiture diesel ($a < -0,5 \text{ m/s}^2$)	0	1,68e-03	-6,62e-05	9,00e-06	2,50e-04	2,91e-04	1,20e-04
	Voiture GPL ($a \geq -0,5 \text{ m/s}^2$)	0	8,92e-04	1,61e-05	-8,06e-07	-8,23e-05	7,60e-05	3,54e-05
	Voiture GPL ($a < -0,5 \text{ m/s}^2$)	0	3,43e-04	0,00e+00	0,00e+00	0,00e+00	0,00e+00	0,00e+00
	VUL	0	3,56e-02	9,71e-03	-2,40e-04	3,26e-02	1,33e-02	1,15e-02
	Bus	0	2,36e-02	6,51e-03	-1,70e-04	2,17e-02	8,94e-03	7,57e-03
VOC	Voiture essence ($a \geq -0,5 \text{ m/s}^2$)	0	4,47e-03	7,32e-07	-2,87e-08	-3,41e-06	4,94e-06	1,66e-06
	Voiture essence ($a < -0,5 \text{ m/s}^2$)	0	2,63e-03	0,00e+00	0,00e+00	0,00e+00	0,00e+00	0,00e+00
	Voiture diesel ($a \geq -0,5 \text{ m/s}^2$)	0	9,22e-05	9,09e-06	-2,29e-07	-2,20e-05	1,69e-05	3,75e-06
	Voiture diesel ($a < -0,5 \text{ m/s}^2$)	0	5,25e-05	7,22e-06	-1,87e-07	0,00e+00	-1,02e-05	-4,22e-06
	Voiture GPL ($a \geq -0,5 \text{ m/s}^2$)	0	1,44e-02	1,74e-07	-6,82e-09	-8,11e-07	1,18e-06	3,96e-07
	Voiture GPL ($a < -0,5 \text{ m/s}^2$)	0	8,42e-03	0,00e+00	0,00e+00	0,00e+00	0,00e+00	0,00e+00
	VUL	0	1,04e-03	4,87e-04	-1,49e-05	1,27e-03	2,10e-04	1,00e-04
	Bus	0	1,55e-03	8,20e-04	-2,42e-05	1,86e-03	3,21e-04	1,36e-04

Polluant	Type de véhicule	E_0	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
PM	Voiture essence	0	0,00e+00	1,57e-05	-9,21e-07	0,00e+00	3,75e-05	1,89e-05
	Voiture diesel	0	0,00e+00	3,13e-04	-1,84e-05	0,00e+00	7,50e-04	3,78e-04
	Voiture GPL	0	0,00e+00	1,57e-05	-9,21e-07	0,00e+00	3,75e-05	1,89e-05
	VUL	0	2,14e-04	3,35e-04	-2,22e-05	2,07e-03	1,80e-03	2,27e-04
	Bus	0	2,23e-04	3,47e-04	-2,38e-05	2,08e-03	1,76e-03	2,23e-04

ANNEXE II

PARAMÉTRAGES PAR DÉFAUT DES MODÈLES ENVIRONNEMENTAUX D'AIMSUN

Pour l'analyse de la sensibilité de l'impact des paramètres généraux des véhicules dans AIMSUN sur les estimations d'émissions par les modèles environnementaux, on utilise le paramétrage par défaut d'AIMSUN. Pour le modèle de consommation de carburant, ce sont les données de la Ford Escort qui sont utilisées.

Tableau A II-1 Paramétrage par défaut du modèle de Panis et al, 2006 dans AIMSUN

Types de Carburant	Limite basse	Valeurs d'émissions					
		Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3	Facteur 4	Facteur 5	Facteur 6
Essence 75 %	0	0,553	0,161	-0,00289	0,266	0,511	0,183
Diesel 15 %	0	0,324	0,0859	0,00496	-0,0586	0,448	0,23
GPL 0 %	0	0,6	0,219	-0,00774	0,357	0,514	0,17
EV 0 %							

Tableau A II-2 Paramétrage par défaut du modèle de consommation de carburant d'AIMSUN

Paramètre	Valeur	Unité
F_i	0,333	ml/s
F_1	5,4	L/100 km à 90 km/h
F_2	7,1	L/100 km à 120 km/h
c_1	0,42	ml/s
c_2	0,26	ml/s
F_d	0,537	ml/s
v_m	50	km/h

Tableau A II-3 Paramétrage par défaut de LEM dans AIMSUN

Carburant		Emission Standard	
Blue	2 %	Zero Emissions	100 %
Diesel	49 %	Euro 0	0 %
		Euro 1	0 %
		Euro 2	0 %
		Euro 3	10 %
		Euro 4	35 %
		Euro 5	50 %
		Euro 6	5 %
		Euro 6c	0 %
Petrol	49 %	Euro 0	0 %
		Euro 1	0 %
		Euro 2	0 %
		Euro 3	0 %
		Euro 4	10 %
		Euro 5	40 %
		Euro 6	50 %

ANNEXE III

TEST DE LA SENSIBILITÉ DE LA DIMENSION DES VÉHICULES SUR LES RÉSULTATS DES MODÈLES ENVIRONNEMENTAUX D'AIMSUN

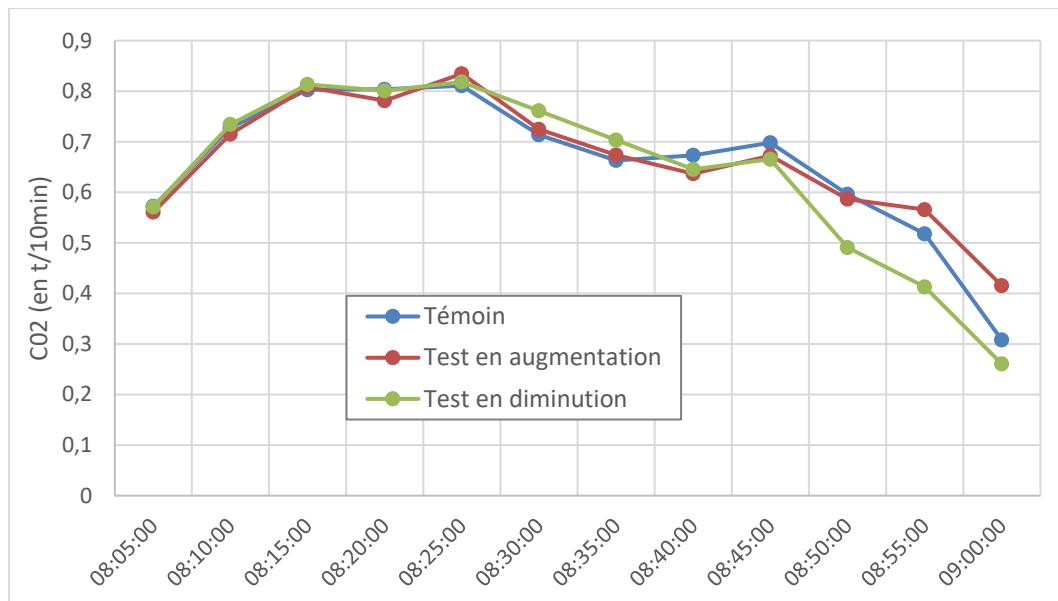


Figure A III-1 Émissions de CO₂ des voitures calculées par Panis pour les tests de l'analyse de sensibilité de la longueur des véhicules

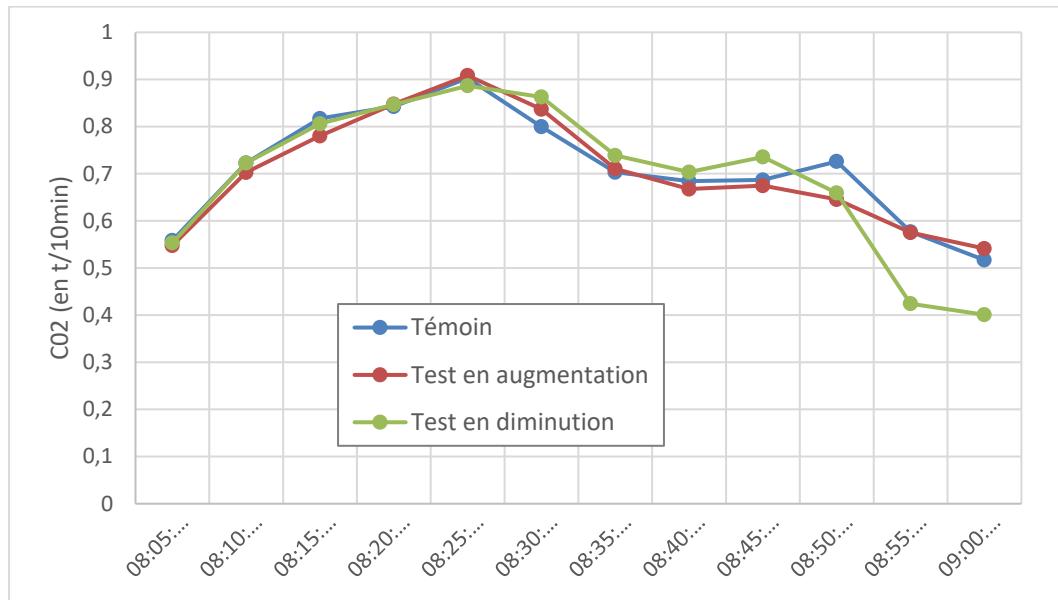


Figure A III-2 Émissions de CO₂ des voitures calculées par le modèle de consommation de carburant pour les tests de l'analyse de sensibilité de la longueur des véhicules

ANNEXE IV

RÉSULTATS DE L'ANALYSE DE SENSIBILITÉ DES PARAMÈTRES D'ACCÉLÉRATION ET DE DÉCÉLÉRATION DES VÉHICULES DANS AIMSUN DIVISÉ PAR LES DISTANCES PARCOURUES

Tableau A IV-1 Résultats de l'analyse de sensibilité des paramètres d'accélération et de décélération des véhicules dans AIMSUN divisé par les distances parcourues

AU TOTAL SUR TOUTE LA SIMULATION			
Test en :	LEM	Panis	Consommation de carburant
Augmentation	- 0.33%	+ 8.05%	+ 14.82%
Diminution	+ 5.63%	+ 2.55%	- 10.73%

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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

AIMSUN. (2021). AIMSUN Next: Editions, Optional components, Programming tools. Repéré à <https://www.aimsun.com/wp-content/uploads/2021/12/Aimsun-Next-complete-guide-to-all-editions-and-extras.pdf>

AIMSUN Next Users Manual. (s. d. a). *Dynamic Traffic Assignment Algorithms*. Repéré à <https://docs.aimsun.com/next/22.0.1/UsersManual/StochasticRouteChoice.html>

AIMSUN Next Users Manual. (s. d. b). Environmental Models. Disponible avec le logiciel à <qthelp://aimsun.com.aimsun.20.0/doc/UsersManual/EnvironmentalModels.html>

AIMSUN Next Users Manual. (s. d. c). Environmental Models. Repéré à <https://docs.aimsun.com/next/22.0.1/UsersManual/EnvironmentalModels.html>

AIMSUN Next Users Manual. (s. d. d). Output Database Definition. Repéré à <https://docs.aimsun.com/next/22.0.1/UsersManual/OutputDatabaseDefinition.html>

AIMSUN Next Users Manual. (s. d. e). The Aimsun Next Environment. Repéré à <https://docs.aimsun.com/next/22.0.1/UsersManual/TheAimsunEnvironment.html>

AIMSUN Next Users Manual. (s. d. f). Vehicle Types. Repéré à <https://docs.aimsun.com/next/22.0.1/UsersManual/VehicleTypneEditing.html#weight>

Antoniou, C., Barcelo, J., Brackstone, M., Celikoglu, H.B., Ciuffo, B., Punzo, V., & Wagner, P. (2014). Traffic Simulation: Case for guidelines (Rapport EUR 26534 EN). doi: 10.2788/11382

Anya, A. R., Roushail, N. M., Frey, H. C., & Schroeder, B. (2014). Application of AIMSUN Microsimulation Model to Estimate Emissions on Signalized Arterial Corridors. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2428(1), 75-86. doi: 10.3141/2428-09

Ashfaq, M., Gu, Z., Waller, S. T., & Saberi, M. (2021). Comparing Dynamic User Equilibrium and Noniterative Stochastic Route Choice in a Simulation-Based Dynamic Traffic Assignment Model: Practical Considerations for Large-Scale Networks. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, 1-16. doi: 10.1155/2021/6667335

Autorité régionale de transport métropolitain (ARTM). (2018). Enquête origine-destination : Faits saillants de l'état de la mobilité des personnes dans la région métropolitaine de Montréal. Repéré à https://www.artm.quebec/wp-content/uploads/2020/01/CA_Faits-saillants_EOD_COMPLET_WEB_14012020_R002.pdf

Barceló, J. (2010). Fundamentals of Traffic Simulation (Vol. 145) [Version SpringerLink]. doi: 10.1007/978-1-4419-6142-6_2

Bureau de la transition écologique et de la résilience, Division Transport, Énergie, Bâtiment. (2022). Inventaire 2018 des émissions de gaz à effet de serre de la collectivité montréalaise. Repéré à https://portail-m4s.s3.montreal.ca/pdf/vdm_sommaire_inventaire_ges_2018.pdf.

Bush, E. & Lemmen, D. S. (2019). Rapport sur le climat changeant du Canada. Gouvernement du Canada. Repéré à https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/energy/Climate-change/pdf/RCCC_FULLREPORT-FR-FINAL.pdf

Direction de l'environnement du Service des infrastructures, du transport et de l'environnement. (2013). Inventaire 2009 des émissions de gaz à effet de serre de la collectivité montréalaise. Repéré à https://portail-m4s.s3.montreal.ca/pdf/inventaire_ges_collectivite_montrealaise_2009.pdf

Dowling, R., Skabardonis, A., Halkias, J., McHale, G., & Zammit, G. (2004). Guidelines for Calibration of Microsimulation Models: Framework and Applications. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1876(1), 1-9. doi: 10.3141/1876-01

Environnement et Changement climatique Canada. (2022a). Rapport d'inventaire national 1990–2020 : sources et puits de gaz à effet de serre au Canada. Repéré à https://publications.gc.ca/collections/collection_2022/eccc/En81-4-2020-1-fra.pdf

Environnement et Changement climatique Canada. (2022b). Rapport d'inventaire national 1990–2020 : sources et puits de gaz à effet de serre au Canada. Repéré à https://publications.gc.ca/collections/collection_2022/eccc/En81-4-2020-2-fra.pdf

Fellendorf, M., & Vortisch, P. (2010). Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM. Dans J. Barceló (Éd.), *Fundamentals of Traffic Simulation* (Vol. 145, pp. 63-93). doi: 10.1007/978-1-4419-6142-6_2

Fong, W. K., Sotos, M., Doust, M., Schultz, S., Marques, A. & Deng-Beck, C. (2021). Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Inventories: An Accounting and Reporting Standard for Cities (Version 1.1). Greenhouse Gas Protocol. Repéré à https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/GPC_Full_MASTER_RW_v7.pdf

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

Ghariani, N., Elkossantini, S., Darmoul, S., & Ben Said, L. (2014). A survey of simulation platforms for the assessment of public transport control systems. Dans International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT), 85-90. doi: 10.1109/ICAdLT.2014.6864088

Gipps, P. G. (1981). A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 15(2), 105-111. doi: 10.1016/0191-2615(81)90037-0

Gouvernement du Canada. (2022). Rapport de données horaires pour le 15 octobre 2018. Repéré à https://climat.meteo.gc.ca/climate_data/hourly_data_f.html?hlyRange=2008-01-08%7C2022-03-30&dlyRange=2002-12-23%7C2022-03-30&mlyRange=%7C&StationID=30165&Prov=QC&urlExtension=_f.html&searchType=stnName&optLimit=yearRange&StartYear=2018&EndYear=2018&selRowPerPage=25&Line=2&searchMethod=contains&txtStationName=Montreal&timeframe=1&time=UTC&time=LST&Year=2018&Month=10&Day=15

Guo, L., Huang, S., & Sadek, A. W. (2013). An Evaluation of Environmental Benefits of Time-Dependent Green Routing in the Greater Buffalo–Niagara Region. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 17(1), 18-30. doi: 10.1080/15472450.2012.704336

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

Hollander, Y., & Liu, R. (2008). The principles of calibrating traffic microsimulation models. *Transportation*, 35 (3), 347-362. doi: 10.1007/s11116-007-9156-2

Institut de la statistique du Québec. (s.d.). Population et structure par âge et sexe. Repéré à <https://statistique.quebec.ca/fr/document/population-et-structure-par-age-et-sexe-le-quebec>

Int Panis, L., Broekx, S., & Liu, R. (2006). Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits. *Science of The Total Environment*, 371(1-3), 270-285. doi: 10.1016/j.scitotenv.2006.08.017

IPCC. (2021). Summary for Policymakers. Dans Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield,

T., Yelekçi, O., Yu, R., & Zhou, B. (éds.), Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32). doi: 10.1017/9781009157896.001

La Banque Mondiale. (2020). Développement urbain : vue d'ensemble. Repérée à <https://www.banquemondiale.org/fr/topic/urbandevelopment/overview>

Lin, J., Chiu, Y.-C., Vallamsundar, S., & Bai, S. (2011). Integration of MOVES and dynamic traffic assignment models for fine-grained transportation and air quality analyses. IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems, 176–181. doi: 10.1109/FISTS.2011.5973657

Lind, G., Schmidt, K., Andersson, H., Algers, S., Canepari, G., Di Taranto, C., Bernauer, E., Bréheret, L., Gabard, J-F., & Fox, K. (1999). Best Practice Manual: Smartest, Simulation Modelling Applied to Road Transport European Scheme Tests.(SMARTEST Project Deliverable D8). Repéré à https://www.researchgate.net/profile/Staffan-Algers/publication/242592697_Best_Practice_Manual/links/543faaf00cf2fd72f99c8993/Best-Practice-Manual.pdf

Liu, B., & Frey, H. C. (2012, juin). Development and Evaluation of a Simplified Version of MOVES for Coupling with a Traffic Simulation Model. Communication présentée à 105th Annual Meeting of the Air & Waste Management Association, San Antonio, Texas. Repéré à <https://pdfs.semanticscholar.org/presentation/ccbf/b7dec860a73d348b53a05c7e06a3b86bd0dc.pdf>

Madi, M. Y. (2016). Investigating and Calibrating the Dynamics of Vehicles in Traffic Micro-simulations Models. Transportation Research Procedia, 14, 1782-1791. doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.144

Michaels, R.M. (1963). Perceptual Factors in Car Following. Proceedings of the 2nd International Symposium on the Theory of Road Traffic Flow, 44-59.

Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires & Ministère de la Transition énergétique. (2017). Normes euros d'émissions de polluants pour les véhicules lourds - Véhicules propres. Repéré à <https://www.ecologie.gouv.fr/normes-euros-demissions-polluants-vehicules-lourds-vehicules-propres>

Ministère de l'Environnement du Québec. (2002). Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre : 1990-2000. Repéré à <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/rapportGES.pdf>

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2021a). Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2019 et leur évolution depuis 1990. Repéré à <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/2019/inventaire1990-2019.pdf>

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2021b). Registre des émissions de gaz à effet de serre. Repérée à <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/registre/index.htm>

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (s. d. a). Engagements du Québec : Nos cibles de réduction d'émissions de GES. Repéré à <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changementsclimatiques/engagement-quebec.asp>

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (s. d. b). Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre. Repérée à <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/index.htm>

Newell, G.F. (2002). A simplified car-following theory: a lower order model. *Transportation Research Part B, Methodological*, 36 (3), 195-205. doi: 10.1016/S0191-2615(00)00044-8

Nations Unies. (s. d.). Action Climat : Les villes et la pollution. Repéré à <https://www.un.org/fr/climatechange/climate-solutions/cities-pollution>

Nocera, S., Basso, M., & Cavallaro, F. (2017). Micro and Macro modelling approaches for the evaluation of the carbon impacts of transportation. *Transportation Research Procedia*, 24, 146-154. doi: 10.1016/j.trpro.2017.05.080

Nouri, P. (2016). Enhancing the gasoline vehicles' CO₂ emissions estimation in Montreal. (Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal). Repéré à https://publications.polymtl.ca/2038/1/2015_PegahNouri.pdf

Olstam, J.J., & Tapani, A. (2004). Comparison of Car-following Models. Repéré à <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:673977/FULLTEXT01.pdf>

Organisation Météorologique Mondiale (OMM). (2022). Mandat : Climat. Repéré à <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate>

Osorio, C., & Punzo, V. (2019). Efficient calibration of microscopic car-following models for large-scale stochastic network simulators. *Transportation Research Part B: Methodological*, 119, 156-173. doi: 10.1016/j.trb.2018.09.005

GIEC 2006, Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux des gaz à effet de serre, préparé par le Programme pour les inventaires nationaux des gaz à effet de serre, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. et Tanabe K. (éds). Publié : IGES, Japon.

Panwai, S. & Dia, H. (2005). Comparative evaluation of microscopic car-following behavior. IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems, 6(3), 314-325. doi : 10.1109/TITS.2005.853705.

QUARTET. (1992). Assessment of Current Tools for Environment Assessment in QUARTET, Drive II Project V2018.

Ressources naturelles Canada. (2019). Guide De Consommation De Carburant 2019. Repéré à <https://www.rncan.gc.ca/sites/www.rncan.gc.ca/files/oee/pdf/transportation/tools/fuelratings/Guide%20de%20consommation%20de%20carburant%202019.pdf>

Rodriguez-Rey, D., Guevara, M., Linares, M. P., Casanovas, J., Salmerón, J., Soret, A., ... Pérez García-Pando, C. (2021). A coupled macroscopic traffic and pollutant emission modelling system for Barcelona. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 92, 102725. doi: 10.1016/j.trd.2021.102725

SAAQ. (2018). *Véhicules en circulation, 2018* [Jeu de données]. Repéré à <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/vehicules-en-circulation>

SAAQ. (2019). *Véhicules en circulation, 2019* [Jeu de données]. Repéré à <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/vehicules-en-circulation>

Saidallah, M., El Fergougui, A., & Elalaoui, A. E. (2016). A Comparative Study of Urban Road Traffic Simulators. *MATEC Web of Conferences*, 81, 05002. doi: 10.1051/matecconf/20168105002.

Saunier, N. (2016). Introduction à AIMSUN pour les modèles microscopiques [Présentation pdf]. Repéré à <http://docplayer.fr/142992029-Introduction-a-aimsun-pour-les-modeles-microscopiques.html>

Shafiei, S., Gu, Z., & Saberi, M. (2018). Calibration and validation of a simulation-based dynamic traffic assignment model for a large-scale congested network. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 86, 169-186. doi: 10.1016/j.simpat.2018.04.006

Société de transport de Montréal (STM), & Comité de Pilotage pour la Quantification des émissions de GES évitées dans la région de Montréal. (2016). Rapport de quantification des émissions de gaz à effet de serre évitées par le transport collectif dans la région métropolitaine de Montréal. https://www.stm.info/sites/default/files/pdf/fr/rapport_quantification_ges_evites.pdf

Statistique Canada. (2021). Enquête annuelle sur l'utilisation finale des produits pétroliers raffinés. Repéré à https://www23.statcan.gc.ca/imdb/p2SV_f.pl?Function=getSurvey&SDDS=2168

Swidan, H. M. (2011). Integrating AIMSUN Micro Simulation Model with Portable Emissions Measurement System (PEMS): Calibration and Validation Case Study. (Thèse de doctorat, Graduate Faculty of North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, US). Repéré à <https://repository.lib.ncsu.edu/bitstream/handle/1840.16/7275/etd.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Sykes, P. (2010). Traffic Simulation with Paramics. Dans J. Barceló (Éd.), Fundamentals of Traffic Simulation (Vol. 145, pp. 131-171). doi: 10.1007/978-1-4419-6142-6_2.

Tu, R., Kamel, I., Wang, A., Abdulhai, B., & Hatzopoulou, M. (2018). Development of a hybrid modelling approach for the generation of an urban on-road transportation emission inventory. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 62, 604-618. doi: 10.1016/j.trd.2018.04.011

USEPA. (2020a). Exhaust Emission Rates for Light-Duty Onroad Vehicles in MOVES3. Repéré à <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P1010MKM.pdf>

USEPA. (2020b). Greenhouse Gas and Energy Consumption Rates for Onroad Vehicles in MOVES3. Repéré à <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P1010M5F.pdf>

USEPA. (2021a). Overview of EPA's MOtor Vehicle Emission Simulator (MOVES3). Repéré à <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P1011KV2.pdf>

USEPA. (2021b). Population and Activity of Onroad Vehicles in MOVES3. Repéré à <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P1011TF8.pdf>

Vieira da Rocha, T., Leclercq, L., Montanino, M., Parzani, C., Punzo, V., Ciuffo, B., & Villegas, D. (2015). Does traffic-related calibration of car-following models provide accurate estimations of vehicle emissions? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 34, 267-280. doi: 10.1016/j.trd.2014.11.006

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

Wang, Y., Szeto, W. Y., Han, K., & Friesz, T. L. (2018). Dynamic traffic assignment: A review of the methodological advances for environmentally sustainable road transportation applications. *Transportation Research Part B: Methodological*, 111, 370-394. doi: 10.1016/j.trb.2018.03.011

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

Xie, Y., Chowdhury, M., Bhavsar, P., & Zhou, Y. (2012). An integrated modeling approach for facilitating emission estimations of alternative fueled vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17 (1), 15-20. doi: 10.1016/j.trd.2011.08.009

