

Vers une modélisation améliorée du secteur du transport dans
l'inventaire d'émissions de gaz à effet de serre
dans la ville de Montréal

Par

Ahmed LABIDI

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

MONTRÉAL, LE 31 AOÛT 2020

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Ahmed Labidi, 2020



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

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

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

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

Mme Claudiane Ouellet-Plamondon, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

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

LE 28 JUILLET 2020

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à ma directrice de recherche, Mme Annie Levasseur. J'ai eu le privilège de travailler sous la direction d'une personne particulièrement intelligente et cordiale. Elle m'a fourni tout le support nécessaire, et beaucoup plus tout au long de mon parcours à l'ÉTS. Je remercie aussi tous les enseignants qui ont contribué à ma formation. Je remercie aussi la Ville de Montréal et Mitacs pour le temps accordé, les réunions constructives et le soutien financier indispensable.

Je dédie principalement ce travail à :

- Mes parents et ma sœur pour leurs supports inconditionnels et continus dans toutes les étapes de mon parcours académique et professionnel.
- Ma compagne pour son amour et son soutien grâce auxquels j'ai pu surmonter beaucoup d'obstacles.
- Mes amis et mes proches qui ont contribué de façon directe ou indirecte au bon déroulement de mon mémoire.

Modélisation améliorée du secteur du transport dans l'inventaire d'émissions de gaz à effet de serre dans la ville de Montréal

Ahmed LABIDI

RÉSUMÉ

La ville de Montréal publie régulièrement l'inventaire annuel des émissions de gaz à effet de serre (GES) du territoire de l'île de Montréal. L'objectif de cet inventaire est de quantifier et de résumer toutes les émissions de GES survenant sur le territoire au cours de l'année. L'inventaire est divisé en secteurs : transports, sources industrielles (combustion et autres émissions), sources commerciales et institutionnelles, sources résidentielles, gestion des déchets et agricultures, foresterie et autres utilisations des terres. Le secteur des transports est le principal contributeur, car il est responsable d'environ 40 % des émissions de GES.

Les inventaires d'émissions de GES sont des outils importants pour identifier les principales activités contributives et pour mesurer l'efficacité globale des plans de réduction des émissions de GES. Cependant, ils impliquent de grandes incertitudes, car les données appropriées ne sont pas toujours disponibles et plusieurs hypothèses doivent être formulées. En effet, dans un monde idéal, chaque mouvement d'une personne produisant des émissions de GES, qu'elle utilise des voitures, des camions, des autobus, des motos, etc. sera enregistré avec la distance parcourue (par la personne) et la vitesse de déplacement, puis il faudrait identifier le moyen de transport avec certaines hypothèses et enfin le multiplier par un facteur d'émission spécifique (masse de GES émis par km) en fonction du type de véhicule. De telles données sur la circulation des véhicules ne sont actuellement pas disponibles et les inventaires des émissions de GES reposent sur des données très incomplètes et approximatives. Alors, l'objectif de ce projet de recherche est d'utiliser les données fournies par l'application MTL Trajet pour enregistrer les mouvements de personnes sur l'île de Montréal pendant un mois afin de fournir des estimations plus précises de la contribution du secteur des transports aux émissions de GES.

Les résultats montrent qu'il y a une différence majeure entre la quantité de GES émis par le secteur du transport routier calculée par la Ville de Montréal et celle calculée à partir de la méthodologie développée dans cette étude. Cette différence est dû aux différentes incertitudes et approximations liées aux deux approches. Toutefois, notre recherche présente une méthodologie qui permet d'améliorer la résolution spatiale et temporelle des émissions de GES et qui permet aussi d'analyser les effets des différents facteurs sur ces émissions comme les conditions climatiques. De plus, cette étude présente des pistes d'amélioration en vue d'éliminer les incertitudes sur les résultats et de construire un inventaire d'émissions de GES de transport routier, précis et exact.

Mots-clés: gaz à effet de serre, transport routier, inventaire, la Ville de Montréal

Improved Modeling of the Transportation Sector in the Inventory of Greenhouse Gas Emissions in the City of Montreal

Ahmed LABIDI

ABSTRACT

On a regular basis, the city of Montreal publishes the annual territorial greenhouse gas (GHG) emission inventory for the island of Montreal. The objective of such an inventory is to quantify and sum up all GHG emissions occurring on the territory during the year. The inventory is divided into sectors: transportation, industrial sources (combustion and other emissions), commercial and institutional sources, residential sources, waste management, and agriculture, forestry and other land uses. The transportation sector is the main contributor as it is responsible for around 40% of GHG emissions.

GHG emission inventories are important tools to identify the main contributing activities and to measure the global efficiency of GHG emission reduction plans. However, they involve high uncertainties as appropriate data is not always available and several assumptions must be made. Indeed, in an ideal world, each movement of a person producing GHG emissions whether they use cars, trucks, buses, motorcycles, etc. occurring on the territory during the year would be recorded with the distance traveled (by the person) and the speed of their movement, and then identify the means of transport with some assumptions, then multiplied by a specific emission factor (mass of GHG emitted per km) according to the type of vehicle. Such data about the movement of vehicles is currently not available, and GHG emission inventories rely on very incomplete and approximate data. Hence, the objective of this research project is to use data provided through the data ofTajet MTL Insights to record people's movements on the island of Montréal during one month in order to provide more accurate estimates of the contribution of the transportation sector to GHG emissions.

The results show that there is a major difference between the quantity of GHGs emitted by the road transportation sector calculated by the City of Montréal and that calculated using the methodology developed in this study. This difference is due to the different uncertainties and approximations made in the two approaches. However, our research presents a methodology that makes it possible to improve the spatial and temporal resolution of GHG emissions and to analyze the effects of various factors on these emissions, such as climatic conditions. In addition, this study presents room for improvement to eliminate uncertainties in the results and to build an accurate and precise inventory of road transportation GHG emissions.

Keywords: greenhouse gases, road transport, inventory, City of Montreal

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	3
1.1 Impact du transport routier urbain sur les changements climatiques.....	3
1.1.1 Changement climatique et gaz à effet de serre	3
1.1.2 Les politiques et les cibles de réduction des émissions de GES	4
1.1.3 L’impact du transport routier	6
1.1.4 Potentiel de réchauffement planétaire.....	8
1.1.5 Inventaire des émissions de GES de la ville de Montréal.....	8
1.1.5.1 Cadre général	8
1.1.5.2 Approche Descendante (Top-Down)	9
1.1.5.3 Approche Ascendante (Bottom-up)	9
1.1.5.4 Limites des deux approches	10
1.2 Émissions de GES et transport routier	11
1.2.1 Paramètres affectant les émissions d’un véhicule (micro-échelle)	12
1.2.1.1 Le démarrage à froid.....	12
1.2.1.2 Le fonctionnement à chaud.....	14
1.2.1.3 Test au laboratoire.....	16
1.2.1.4 Autres facteurs	17
1.2.2 Paramètres affectant les émissions à l’échelle urbaine (macro-échelle)...	18
1.2.2.1 Croissance démographique et aménagement territorial	18
1.2.2.2 Le transport actif et le transport en commun	19
1.2.2.3 Les aléas climatiques	20
1.3 Outils disponibles pour estimer les activités dans une approche Bottom-Up.....	21
1.3.1 Enquête Origine/Destination.....	21
1.3.2 TELUS Insights	22
1.3.3 L’application MTL Trajet	23
CHAPITRE 2 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE	25
2.1 Objectifs.....	26
2.2 Méthodologie	27
2.2.1 Traitement de données de MTL Trajet	29
2.2.1.1 Justification du choix de la source de données	29
2.2.1.2 Le logiciel QGIS	30
2.2.1.3 L’implémentation des données	30
2.2.1.4 La visualisation des données.....	31
2.2.1.5 Extraction et conversion des données	33
2.2.1.6 Étude des tendances à travers des graphiques.....	36
2.2.2 La résilience des citoyens envers le transport face aux aléas climatiques	37
2.2.2.1 Les données météorologiques	37

2.2.2.2	Représentation de la densité spatiale	39
2.2.3	Méthodologie de calcul des émissions de GES du transport routier	40
2.2.3.1	Activités routières	41
2.2.3.2	Consommation de carburant	45
2.2.3.3	Facteurs d'émission	47
2.2.3.4	Modèle Bottom-Up d'estimation des émissions de GES du transport routier.....	48
2.2.3.5	Méthodologie d'extrapolation.....	49
2.3	Conclusion et organigramme	Erreur ! Signet non défini.
CHAPITRE 3	RÉSULTATS ET INTERPRETATION	51
3.1	Lecture et interprétation des tendances	51
3.1.1	Pourcentage des modes de transport par jour	51
3.1.2	Modification des habitudes de transport en fonction de la température et des précipitations	54
3.1.2.1	Journées de fin de semaine vs Journées de la semaine	58
3.1.2.2	Heures de pointe vs en-dehors des heures de pointe.....	60
3.2	Les données GPS de MTL Trajet.....	63
3.3	Calcul des émissions de GES du transport urbain	66
3.3.1	Activités routières	66
3.3.1.1	Kilomètres parcourus	66
3.3.1.2	Types de véhicule et de carburant.....	67
3.3.2	Estimation des émissions de GES du transport routier	68
3.3.3	Extrapolation et comparaison	69
CHAPITRE 4	DISCUSSION	71
CONCLUSION		77
RECOMMANDATIONS		79
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		81

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1	Coefficients de potentiel de réchauffement planétaire (ministère du Développement durable et de la lutte contre les changements climatiques, 2018).....40
Tableau 2.2	Les côtes de consommations de carburant par type de véhicule47
Tableau 2.3	Facteurs d'émissions des véhicules à essences (g/L) (La Ville de Montréal, 2019).....48
Tableau 2.4	Facteurs d'émissions des véhicules au diesel (g/L) (La Ville de Montréal, 2019).....48
Tableau 3.1	Classification des voyages dans le fichier « point » suivant le mode.....64
Tableau 3.2	Les nombres et les pourcentages de points GPS par mode de transport64
Tableau 3.3	Calcul de l'activité routière avec les données de MTL Trajet.....67
Tableau 3.4	Pourcentage des différents types de véhicules par rapport à l'ensemble de la flotte67
Tableau 3.5	Pourcentage des véhicules et camions légers par type de carburant68
Tableau 3.6	Quantités de GES émis pendant la semaine du 18 au 24 septembre69

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 L'évolution de l'indice global de la température de la terre et de l'océan (Hansen, J. E., & Schmunk, R. B, 2011).....	4
Figure 1.2 Répartition des émissions de GES par.....	7
Figure 1.3 Méthodologie de calcul avec l'approche Bottom-Up (World Resources Institute, 2014).....	10
Figure 1.4 Évolution de l'émission instantanée d'un véhicule en fonction du temps (Weilenmann et al., 2009)	13
Figure 1.5 Facteurs d'émissions et de consommation de carburant (g/km) par rapport à la vitesse instantanée du véhicule (Tong et al., 2000)	14
Figure 1.6 Évolution des émissions en fonction du sous-cycle (Weilenmann et al., 2009).....	15
Figure 1.7 Exemple d'un laboratoire de test d'émissions.....	16
Figure 1.8 Interface utilisateur de l'application MTL Trajet.....	24
Figure 2.1 Paramétrage du QGIS pour ajouter une couche vectrice « Vector Layer »..	31
Figure 2.2 Représentation GIS globale du fichier « Trajets ».....	32
Figure 2.3 Représentation GIS globale du fichier « Points ».....	33
Figure 2.4 Composition du fichier « Trajets »	34
Figure 2.5 Composition du fichier « Points »	35
Figure 2.6 Composition du fichier des données météorologiques.....	38

Figure 2.7	Paramétrages du QGIS pour visualiser les densités spatiales.....	39
Figure 2.8	Fonction « GetDistance » qui calcule la distance en kilomètre entre deux points GPS	42
Figure 2.9	Nombre de véhicules en circulation selon le type d'utilisation, le type de véhicule et l'âge du véhicule à Montréal (Société de l'assurance automobile du Québec (SAAQ), 2019)	44
Figure 2.10	Les véhicules autorisés à circuler en 2017 selon leurs caractéristiques et les données sociodémographiques	46
Figure 3.1	Représentation du pourcentage de chaque mode ou combinaison de modes de transport par jour.....	52
Figure 3.2	Pourcentage des cinq principaux modes de transport par jour	53
Figure 3.3	Pourcentages des cinq principaux modes de transport et évolution de la température	55
Figure 3.4	Pourcentage des principaux modes de transport et précipitations quotidiennes.....	57
Figure 3.5	Représentation sur QGIS de la densité piétonnière pour la journée du mercredi 20 septembre 2017	58
Figure 3.6	Représentation sur QGIS de la densité piétonnière pour la journée du samedi 23 septembre 2017	59
Figure 3.7	Représentation sur QGIS de la densité des piétons du 18 au 22 septembre aux heures de pointe	60

Figure 3.8	Représentation sur QGIS de la densité des piétons du 18 au 22 septembre hors des heures de pointe (à gauche, de 19 h à 6 h et à droite, de 9 h à 16 h)	61
Figure 3.9	Représentation sur QGIS de la densité routière le jeudi 21 septembre 2017 aux heures de pointe	62
Figure 3.10	Représentation sur QGIS de la densité routière le jeudi 21 septembre 2017 hors des heures de pointe (à gauche, de 9 h à 16 h et à droite, de 19 h à 6 h)	63
Figure 3.11	Représentation d'un déplacement étrange sur QGIS.....	65

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

CH_4	Méthane
N_2O	L'oxyde nitreux
GES	Gaz à effet de serre
COP21	21e conférence des parties
CO_2	Dioxyde de Carbone
CO_2 éq	Équivalent Dioxyde de carbone
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du Climat
G7	Le groupe des sept
EOD	Enquête Origine-Destination
MTL	Montréal
GPS	« Global Positioning System »
GIS	« Geographic Information System »
CVS	« Comma Separated Values »
PIUP	Procédés industriels et utilisation de produits
AFAT	l'agriculture, la foresterie et autres affectations des terres
VKT	Vehicle-KilometersTraveled
VMT	Vehicle-MilesTraveled

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

km	Kilomètres
l	litre
g	gramme
kg CO_2 éq	Kilogramme de CO_2 équivalent
t CO_2 éq	Tonne de CO_2 équivalent
kt CO_2 éq	Kilotonne de CO_2 équivalent
PJ	Pétajoule

INTRODUCTION

Avec d'autres gaz à effet de serre, tels que le protoxyde d'azote et le méthane, le dioxyde de carbone est indispensable pour maintenir une température habitable sur la planète : Sans GES, notre terre serait tout simplement trop froide. On a estimé que sans ces gaz, la température moyenne à la surface de la Terre serait d'environ -18 degrés Celsius. (« NASA GISS: Science Briefs: Greenhouse Gases: Refining the Role of Carbon Dioxide », s. d.). Cependant, depuis la révolution industrielle, l'utilisation de l'énergie fossile a entraîné une augmentation exponentielle des émissions de CO_2 , perturbant ainsi le cycle global du carbone et entraînant un impact sur le réchauffement planétaire.

Le changement climatique est devenu la principale préoccupation environnementale au cours des dernières années. On sait que l'augmentation du niveau de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère est le principal facteur et que le secteur des transports peut être considéré comme le principal contributeur en Amérique du Nord, notamment à Montréal, avec un pourcentage qui s'élève à environ 40 % des émissions totales (La Ville de Montréal 2019). En plus du changement climatique, les émissions provenant des moyens de transport peuvent également affecter la qualité de l'air, le niveau sonore, la qualité de l'eau, la qualité des infrastructures et des chaussées, la biodiversité, etc.

De nombreuses parties prenantes cherchent des méthodes pour réduire les émissions de dioxyde de carbone (CO_2), mais des inventaires d'émissions de GES fiables, robustes, et à haute résolution spatiale et temporelle sont nécessaires pour les guider. Par conséquent, il est important d'être en mesure de bien quantifier les émissions et de corriger l'inventaire classique d'émissions de GES à partir de mesures réelles puisque l'inventaire classique est plutôt basé sur des données statistiques et sur de nombreuses hypothèses et approximations.

La présente étude a pour objectif principal de contribuer à l'amélioration des méthodes et des modèles d'estimation des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur du transport urbain. Les différentes limites de notre recherche proviennent principalement de la pondération et de l'extrapolation des données utilisées qui peuvent compromettre la précision des résultats

obtenus. Plusieurs pistes d'amélioration et des recommandations concernant la collecte des données par l'application ont été proposées afin de guider les prochaines étapes vers une méthode améliorée pour la quantification des émissions de GES du transport routier urbain.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

La première partie de ce premier chapitre présente les différentes notions, répercussions et politiques relatives à notre problème principal, soit la pollution atmosphérique provenant du transport urbain. En deuxième lieu, une analyse complète des méthodologies et études disponibles sur l'estimation des émissions de GES permettra d'identifier les améliorations possibles en relation avec les ressources disponibles.

1.1 Impact du transport routier urbain sur les changements climatiques

1.1.1 Changement climatique et gaz à effet de serre

Le climat est essentiellement défini comme les conditions météorologiques moyennes telles que la température, les précipitations, la direction et la vitesse du vent sur une période de 30 ans. Par conséquent, le changement climatique est « un changement des propriétés statistiques des conditions météorologiques et du climat, en termes de moyenne, de variabilité, ou les deux. » (Australian Academy of Science s. d.)

Depuis les dernières décennies, l'atmosphère contient de plus en plus de particules et de gaz polluants tels que les gaz à effet de serre qui sont principalement : vapeur d'eau (H_2O), dioxyde de carbone (CO_2), méthane (CH_4), oxyde nitreux (N_2O), ozone (O_3), chlorofluorocarbures (CFC) et tétrachlorure de carbone (CCl_4). Ces derniers sont responsables de l'augmentation de la température de +1 °C durant les 50 dernières années (Climate 2020).

La figure 1.1 illustre les variations de la température de la surface terrestre et de l'océan depuis 1880. Les enregistrements font apparaître une augmentation constante qui a débuté plus clairement vers 1920; l'augmentation a été plus importante depuis l'année 1985.

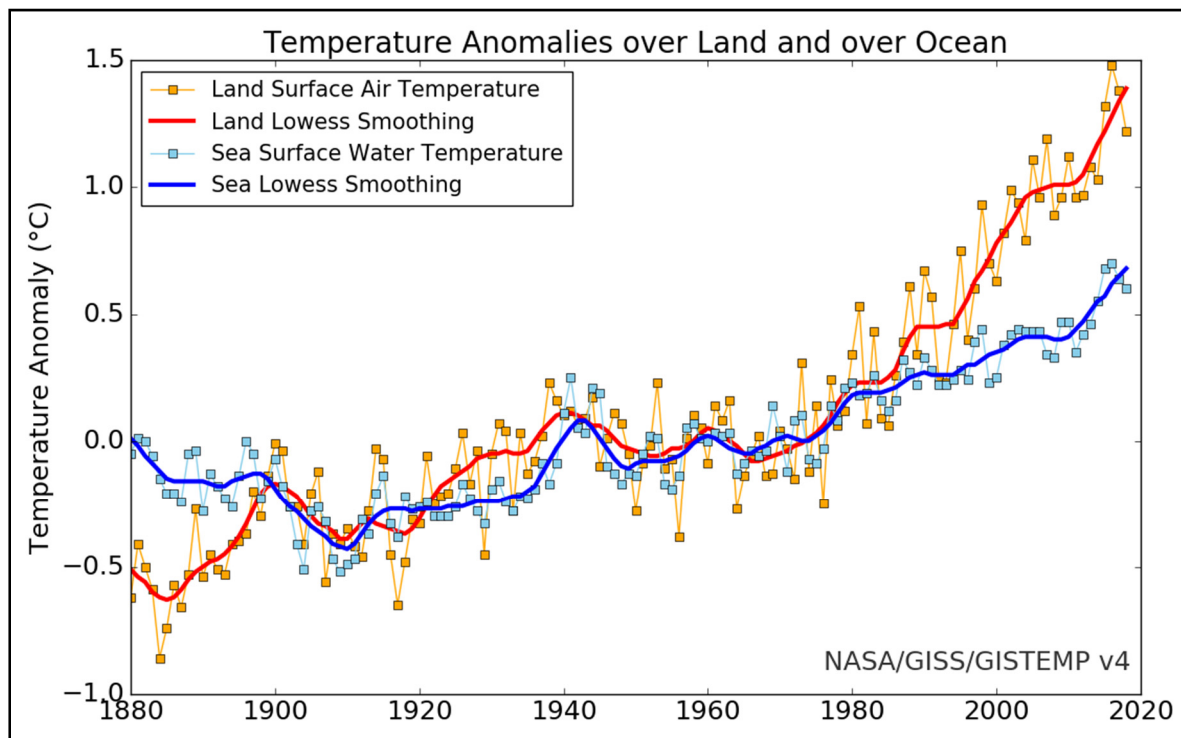


Figure 1.1 : L'évolution de l'indice global de la température de la terre et de l'océan (Hansen, J. E., & Schmunk, R. B 2011)

Cette augmentation dans la température moyenne de l'atmosphère et de l'océan a une influence majeure sur l'environnement. L'élévation du niveau de la mer, la multiplication des phénomènes météorologiques extrêmes, la fonte des glaciers, la sécheresse et les averses sont quelques-uns des principaux impacts, affectant l'économie et le bien-être de la population mondiale, incluant Montréal. Certains de ces changements sont irréversibles, tels que la fonte des glaciers et l'extinction d'espèces en raison de la modification de leur habitat (Metz 2010).

1.1.2 Les politiques et les cibles de réduction des émissions de GES

À partir de la 21e Conférence des parties (COP21) à Paris en décembre 2015, les dirigeants mondiaux se sont entendus pour prendre des mesures en vue de limiter l'augmentation de la température moyenne annuelle de l'air à la surface (global mean annual surface air temperature

« GMAT ») à un niveau inférieur à 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels et de poursuivre les efforts pour atteindre l'objectif de 1,5 °C. L'augmentation du GMAT de 1,5 à 2 °C, facteur crucial pour les recommandations politiques et les stratégies d'atténuation à l'échelle mondiale, n'est pas un indicateur utile pour l'évaluation des impacts et la planification de l'adaptation aux échelles régionales. Les régions terrestres de l'hémisphère nord, incluant le Canada, se réchauffent plus rapidement que le globe et devraient dépasser l'objectif de 2 °C avant l'estimation globale (Karmalkar et Bradley 2017). Par conséquent, des informations sur les projections climatiques régionales s'avèrent primordiales et plus importantes que jamais, afin de maintenir non seulement des mises à jour en temps réel sur l'avancement de la gravité de la situation, mais aussi sur l'efficacité des moyens et des politiques qui ont pour but l'atténuation des émissions des GES.

En 2020 et au-delà, les changements climatiques sont de plus en plus intégrés aux outils législatifs et réglementaires, ainsi qu'aux outils de planification et d'aide à la décision propres au gouvernement et ce, dans l'ensemble de l'administration publique. Sur la scène canadienne, l'État québécois a inspiré les entreprises, les collectivités et les citoyens en matière de changements climatiques grâce à des mesures novatrices visant ses propres activités. Le gouvernement provincial incitera son partenaire fédéral à faire preuve de plus d'ambition et à intensifier son action, en renforçant la collaboration dans des domaines prioritaires pour la population du Québec, tels que l'électrification des transports, l'efficacité énergétique et l'augmentation de l'offre de transport collectif (*Ministère du Développement durable*, 2013.)

En effet, le Québec contribue fortement aux efforts mondiaux visant à réduire les émissions de GES en diminuant, en premier lieu, ses propres émissions. Le Québec ne cesse de se joindre aux chefs de file en matière de réduction d'émissions en adoptant des cibles ambitieuses : 6 % sous le niveau de 1990 en 2012 et 20 % sous le niveau de 1990 en 2020. Le dépassement de la cible de 2012 (8 % sous 1990) indique que le Québec est sur la bonne voie. Par contre, en 2017 on a enregistré une réduction de 8,7 % (ministère de l'Environnement et de la lutte contre les changements climatiques, 2019) par rapport à 1990, qui nous éloigne considérablement de la

cible de 20 % envisagée pour 2020. La province s'est dotée aussi d'un objectif à long terme visant la réduction de 80 à 95 % des émissions de GES d'ici 2050. À la suite d'une commission parlementaire de l'Assemblée nationale, le Québec s'est doté d'une cible de réduction de 37,5 % sous le niveau de 1990 d'ici 2030. Le Québec respecte l'engagement qu'il a pris aux côtés des dix autres États et provinces partenaires de la Conférence des gouverneurs de la Nouvelle-Angleterre et des Premiers ministres de l'Est du Canada (CGNA-PMEC) envers une cible régionale de réduction d'émissions de GES de 35 % à 45 % sous le niveau de 1990 d'ici 2030 (Gouvernement du Québec 2020).

En ce qui concerne Montréal, la Ville s'est engagée à réduire d'ici 2020 les émissions de gaz à effet de serre de la collectivité montréalaise de 30 % par rapport à 1990 et la réduction globale de 28 % des émissions de la collectivité montréalaise en 2015 s'aligne parfaitement avec cet objectif de réduction fixé en 2005 (La Ville de Montréal 2019).

1.1.3 L'impact du transport routier

Les transports sont responsables d'environ 30 % des émissions de gaz à effet de serre en Amérique du Nord, les véhicules privés représentant plus de la moitié de ces émissions (AIE, 2002). Étant donné l'importance de l'énergie hydroélectrique, la proportion des émissions des véhicules est encore plus grande dans la province de Québec. L'ensemble du secteur du transport compte pour environ 70 % de la consommation totale des produits pétroliers utilisés à des fins énergétiques au Québec. De 1990 à 2017, la consommation d'énergie totale du secteur a augmenté de plus de 34 %, soit 534 PJ, dont 79 % consommé par le transport routier (Whitmore, J. & Pineau 2020).

La présente étude porte principalement sur la province de Québec et plus précisément, sur la ville de Montréal. Tel que montré à la Figure 1.2, les émissions de GES du secteur du transport de la collectivité montréalaise ont augmenté de 14 % en 2013 par rapport à 1990, passant de 4 091 à 4 665 ktéq. CO_2 et réalisant 40 % de part dans les émissions totales de la ville.

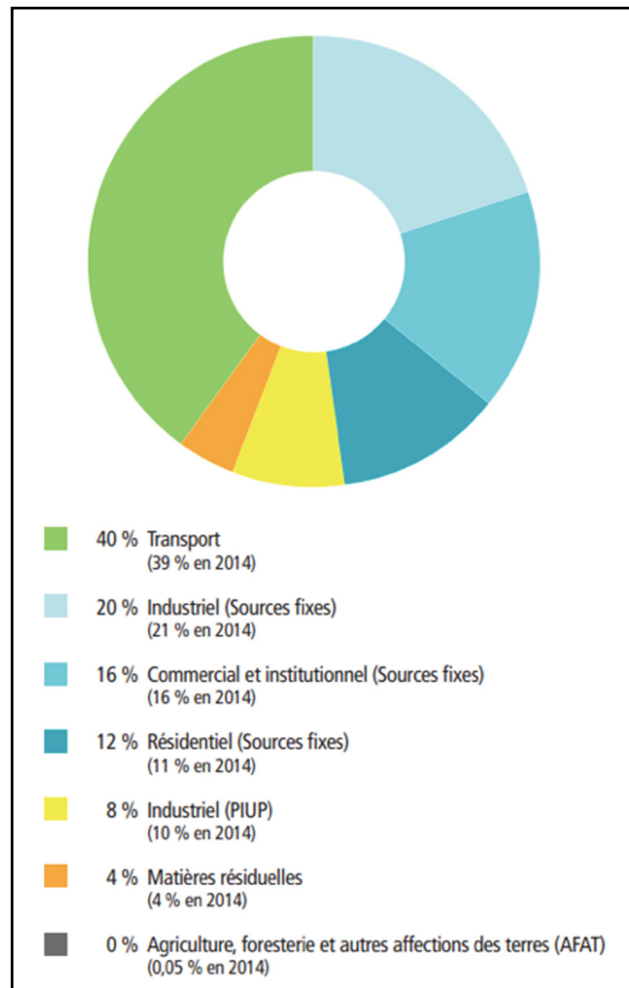


Figure 1.2 : Répartition des émissions de GES par secteur dans l'inventaire de GES de la collectivité montréalaise de 2015 (La Ville de Montréal 2019)

Cette hausse est expliquée par l'augmentation des émissions de GES de quatre des cinq moyens de transport, dont le transport routier. En effet, l'augmentation de GES du transport routier représente à elle seule 86 % de l'augmentation totale des émissions de GES de ce secteur à Montréal.

1.1.4 Potentiel de réchauffement planétaire

Le potentiel de réchauffement planétaire (PRP) est une mesure qui permet d'examiner la capacité de chaque gaz à effet de serre à piéger la chaleur dans l'atmosphère, autrement appelé le forçage radiatif. Les valeurs du PRP décrivent ce phénomène d'une unité d'un GES donné par rapport à une unité de CO_2 et ils convertissent les données relatives aux émissions de GES pour les gaz autres que le CO_2 en unités d'équivalent dioxyde de carbone (CO_2 éq). Comme le forçage radiatif est fonction de la concentration de GES dans l'atmosphère et que la méthode de calcul du PRP continue d'évoluer, les facteurs de PRP sont réévalués tous les 6 ou 7 ans dans les rapports d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). La valeur du PRP d'un GES dépend de l'horizon temporel sur lequel le potentiel a été calculé (World Resources Institute 2014)

Dans notre étude sur les émissions GES qui proviennent du secteur du transport, nous allons nous concentrer sur les principaux gaz à effet de serre émis par combustion fossile qui sont le dioxyde de carbone CO_2 , le méthane CH_4 et l'oxyde nitreux N_2O .

1.1.5 Inventaire des émissions de GES de la ville de Montréal

1.1.5.1 Cadre général

L'inventaire des émissions des gaz à effet de serre répertorie les émissions estimées de GES de la collectivité montréalaise dont le périmètre se limite à l'agglomération de Montréal (La Ville de Montréal 2019). La planification contre les changements climatiques commence par la création des inventaires des villes. Ce dernier, à Montréal, a été réalisé suivant des normes internationales, qui offrent aux villes et aux gouvernements un système solide, transparent et mondialement accepté pour identifier et calculer de manière cohérente les émissions de gaz à effet de serre des villes (World Resources Institute 2014). L'ensemble des normes et des méthodologies sont regroupées dans le Protocole mondial pour les inventaires des gaz à effet de serre à l'échelle communautaire (Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas

Emission Inventories). Selon le Protocole, les méthodes d'estimation des émissions dues aux transports peuvent être classées en deux grandes catégories : les approches Descendante et Ascendante.

1.1.5.2 Approche Descendante (Top-Down)

En s'appuyant sur ce Protocole et dans le cas de la ville de Montréal, la méthodologie utilisée pour l'estimation des émissions des gaz à effet de serre dans le secteur du transport routier est celle de la vente de carburants. C'est à dire que les données sur les ventes nettes de carburants (essence et diesel) de la Régie de l'énergie du Québec sont utilisées pour estimer la quantité annuelle de carburant utilisé sur les routes de la ville. Ensuite, un coefficient d'émission moyen (en g/L) est calculé pour le CH_4 et N_2O en se basant sur le registre d'immatriculation de la Société de l'assurance automobile du Québec (SAAQ), par rapport au type et l'âge du véhicule. Le coefficient d'émission pour le CO_2 est considéré comme identique pour tous les types de véhicules avec, toutefois, une différence suivant le type de carburant. (La Ville de Montréal 2019)

1.1.5.3 Approche Ascendante (Bottom-up)

Cette approche vise à quantifier les émissions du secteur des transports pour les voyages qui commencent, se terminent ou sont entièrement contenus dans la ville (excluant généralement les voyages de passage à travers la ville). La méthode s'appuie sur des modèles ou des enquêtes pour évaluer le nombre de kilomètres parcourus en transport routier, tant transfrontaliers qu'intra frontaliers. Cela donne un nombre de véhicule-kilomètres parcourus (VehicleKilometersTraveled VKT) pour chaque classe de véhicules identifiés. Il faut combiner cette information aux cotes de consommation de carburant des véhicules et aux facteurs d'émission des différents combustibles pour obtenir une estimation des GES émis par le transport routier selon l'approche Ascendante (figure 1.3).

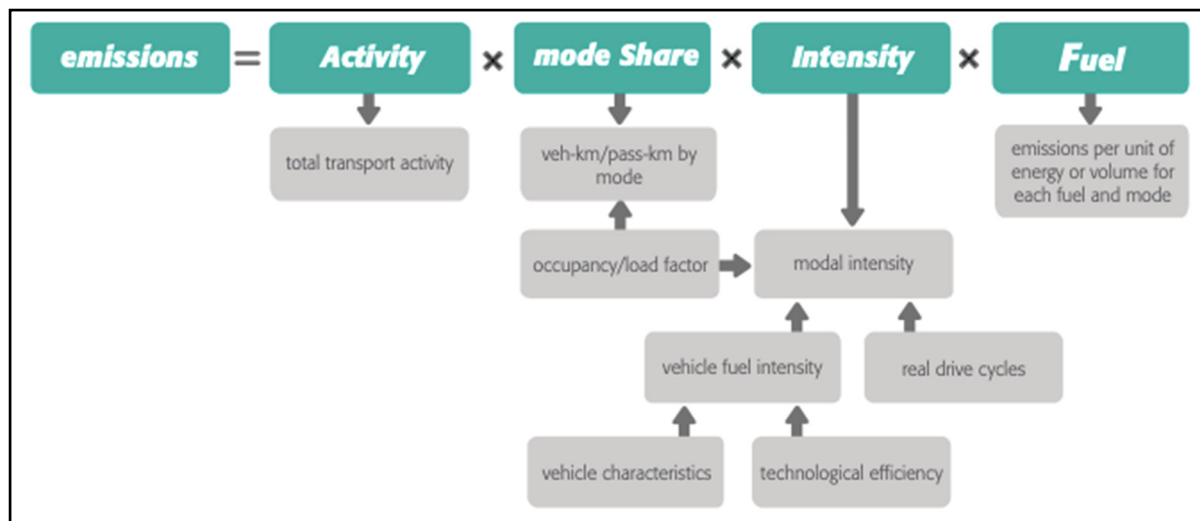


Figure 1.3 : Méthodologie de calcul avec l'approche Ascendante (Bottom-up) (World Resources Institute 2014)

1.1.5.4 Limites des deux approches

L'approche Descendante, utilisée par la Ville de Montréal pour établir l'inventaire de la collectivité montréalaise, présente différentes limites. En se basant sur la vente des carburants en litres, on considère que l'essence et le diesel vendus sur le territoire montréalais sont utilisés tous les deux pour le transport routier, alors que pour chacun d'eux les raisons peuvent être différentes. En plus, le carburant vendu à Montréal peut être brûlé à l'extérieur ; par exemple, on fait le plein à Montréal pour aller vers Québec, tandis que des véhicules provenant des banlieues peuvent faire le plein en banlieue, puis venir rouler à Montréal. Une autre limite importante est que cet inventaire nous donne une seule valeur pour l'année. Il est impossible de comprendre ce qui affecte les émissions, c'est-à-dire de relier les différents paramètres aux émissions. Cette méthodologie, permettrait au mieux de calculer l'inventaire d'émissions de la collectivité une fois par an, car on utilise les données de la Régie de l'énergie du Québec pour les carburants. Mais dans la réalité, le dernier rapport de l'inventaire de la collectivité montréalaise date de l'année 2015 et a été publié en 2019. Ce retard dans les publications des rapports d'inventaire nous prive essentiellement de la possibilité de calculer en temps presque

réel les effets des mesures de réduction de gaz à effet de serre. En outre, on constate un manque de précision et de résolution spatiale et temporelle.

Bien que l'approche Ascendante aide à produire un inventaire d'émissions de GES beaucoup plus détaillé et plus précis en minimisant les incertitudes liées à la méthodologie de vente de carburants et en permettant de lier directement les différentes activités aux émissions et d'avoir ainsi un inventaire avec une résolution spatiale et temporelle améliorée, elle présente aussi des limites. Dans ces calculs, nous ne prenons pas en considération les différents facteurs qui influencent les émissions, comme la vitesse des véhicules, l'état et la qualité des chaussées, la température, etc. Différentes incertitudes s'appliquent sur les coefficients d'émissions des trois principaux gaz à effet de serre. En outre, l'approche basée sur le calcul des kilométrages parcourus sur le réseau routier est plus coûteuse, plus longue à développer et ses spécificités techniques, tout comme la variation des modèles utilisés, la rendent moins comparable entre les villes. De ce fait, la plupart des villes commencent par des approches Descendante et progressent vers des méthodologies Ascendante, plus détaillées qui permettent des évaluations plus efficaces des émissions GES et de la planification des transports. Un inventaire solide peut utiliser les données de chaque approche pour valider les résultats et améliorer la fiabilité (World Resources Institute 2014). L'un de nos objectifs sera alors d'explorer la possibilité d'utiliser une approche Ascendante pour la ville de Montréal qui serait moins compliquée à utiliser. Il existe de nouvelles sources de données disponibles pour estimer les déplacements dans le cadre d'une approche Ascendante comme l'utilisation des données cellulaires et les applications comme Mtl Trajet dont nous parlerons plus en détails un peu plus loin de ce mémoire. L'apparition de telles sources de données laisse croire qu'il est possible de développer une approche Ascendante plus fiable et facile à utiliser.

1.2 Émissions de GES et transport routier

En ce qui concerne l'objectif principal de cette recherche, qui vise à améliorer la méthodologie d'estimation des émissions du transport urbain, les facteurs et les paramètres qui les influencent

présentent un point très important sur lequel nous avons concentré cette section de notre revue de la littérature. Ces paramètres sont classés suivant deux échelles : micro-échelle et macro-échelle.

1.2.1 Paramètres affectant les émissions d'un véhicule (micro-échelle)

Au début des années 80, des études sur les estimations des émissions ont été lancées, en considérant les différentes variables qui influencent les mesures de la consommation des carburants. Depuis ce temps, les technologies et les méthodes n'ont pas cessé d'évoluer et de se diversifier. Cependant, le concept principal utilisé pour estimer les émissions produites par les véhicules n'a pas changé. On essaye toujours d'estimer les consommations des carburants dans deux situations principales dans lesquelles le véhicule se trouve : le démarrage à froid et le fonctionnement normal à chaud.

1.2.1.1 Le démarrage à froid

L'évolution de l'émission instantanée d'un véhicule dans le temps, pour un véhicule donné, en régime moteur et en température initiale du moteur donnés, peut être divisée en une première phase avec une émission décroissante due à l'augmentation progressive de la température du moteur ou du catalyseur, suivie d'une phase de stabilité lorsque la température normale du moteur est atteinte (Figure 1.4). Le temps nécessaire pour atteindre des émissions stabilisées s'appelle t_{cold} .

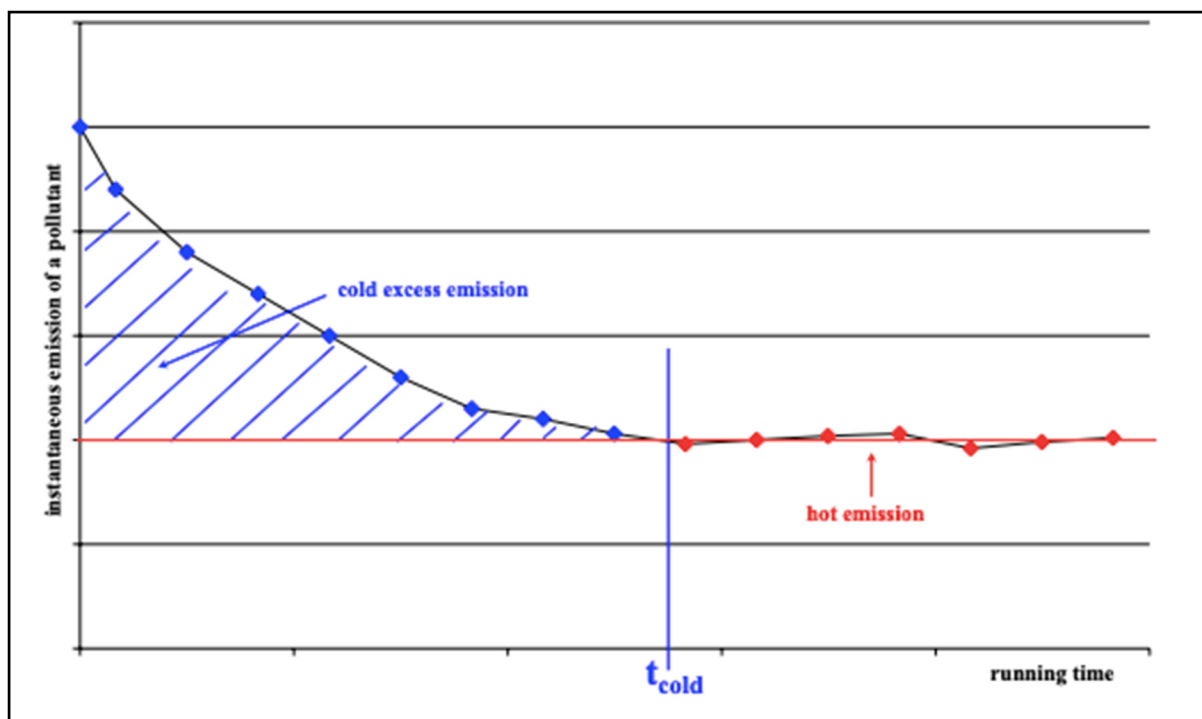


Figure 1.4: Évolution de l'émission instantanée d'un véhicule en fonction du temps (Weilenmann, Favez, et Alvarez 2009)

Les émissions des voitures modernes à essence et diesel sont réduites par les catalyseurs sauf lors des démarrages à froid. Étant donné que les catalyseurs nécessitent une certaine température (généralement supérieure à 300 °C) pour atteindre leur pleine efficacité, les émissions sont nettement plus élevées pendant la phase de préchauffage de la voiture (Weilenmann et al. 2009). L'utilisation des équations qui modélisent le démarrage à froid, développées par (André et Joumard 2005) et ayant pour but d'optimiser l'estimation des émissions, est un processus sensible et le risque d'erreur est énorme à cause du grand nombre de paramètres qui entrent dans ces équations comme : la vitesse moyenne en kilomètres par heure pendant le démarrage froid, la température ambiante en degrés Celsius, le temps de stationnement en heures, etc.

1.2.1.2 Le fonctionnement à chaud

L'influence de la vitesse instantanée du véhicule sur les émissions et la consommation de carburant a été étudiée par (Tong, Hung, et Cheung 2000). Il a été constaté que les facteurs d'émission basés sur le carburant variaient beaucoup moins que les facteurs d'émission basés sur le temps et la distance lorsque la vitesse instantanée changeait. Les tendances sont semblables aux résultats obtenus lors des tests de laboratoire tels que présentés dans la partie 1.3. La faible vitesse de conduite a contribué à une partie importante des émissions totales au cours d'un voyage comme l'indique la figure 1.5. Les quatre modes de conduite standard sont l'accélération, la croisière, la décélération et la marche au ralenti. Il a été constaté que les modes de conduite transitoires (accélération et décélération) étaient plus polluants que les modes de conduite à vitesse constante (croisière et ralenti) en termes de g/km et de g/sec (Tong et al. 2000).

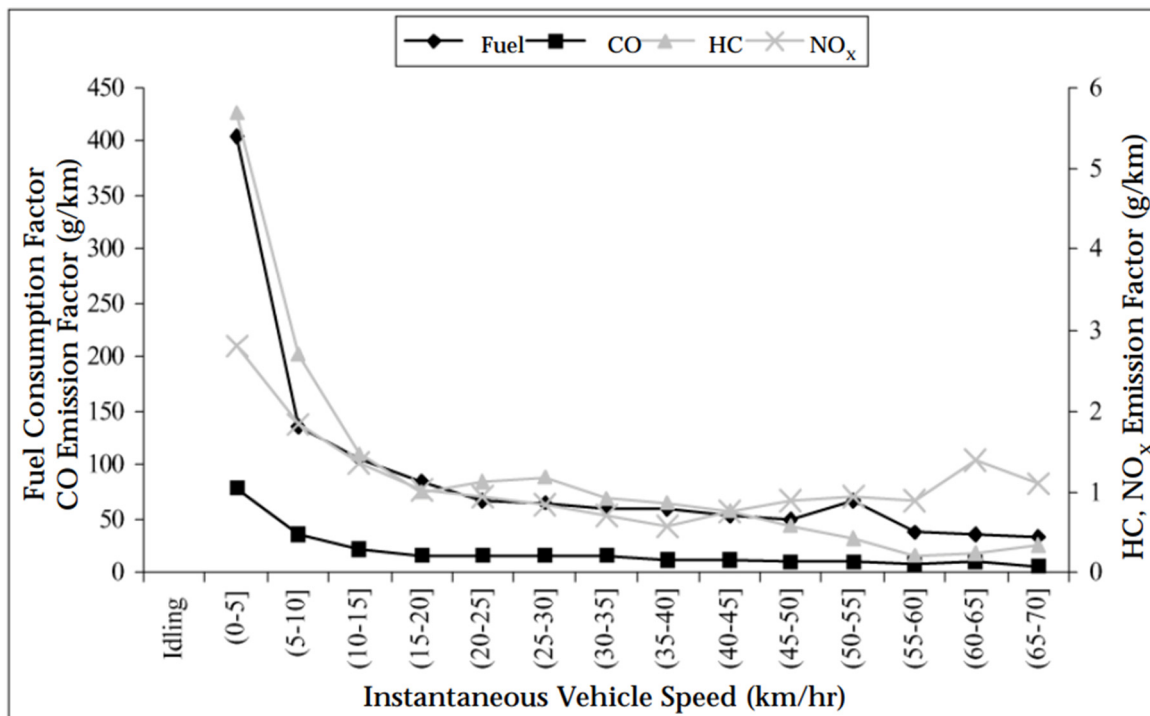


Figure 1.5: Facteurs d'émissions et de consommation de carburant (g/km) par rapport à la vitesse instantanée du véhicule (Tong et al. 2000)

Pour les voyages impliquant un véhicule à moteur en mode unique ou combiné, les émissions sont estimées en utilisant la distance et la vitesse moyenne d'une partie d'un voyage, qui s'appelle sous cycle, le taux de consommation de carburant du véhicule et les facteurs d'émission de GES.

Dans le cas général, on peut conclure que le démarrage à froid nécessite une quantité plus importante de carburant comme l'indique la figure 1.6, d'où l'impact sur les calculs avec l'approche Descendante.

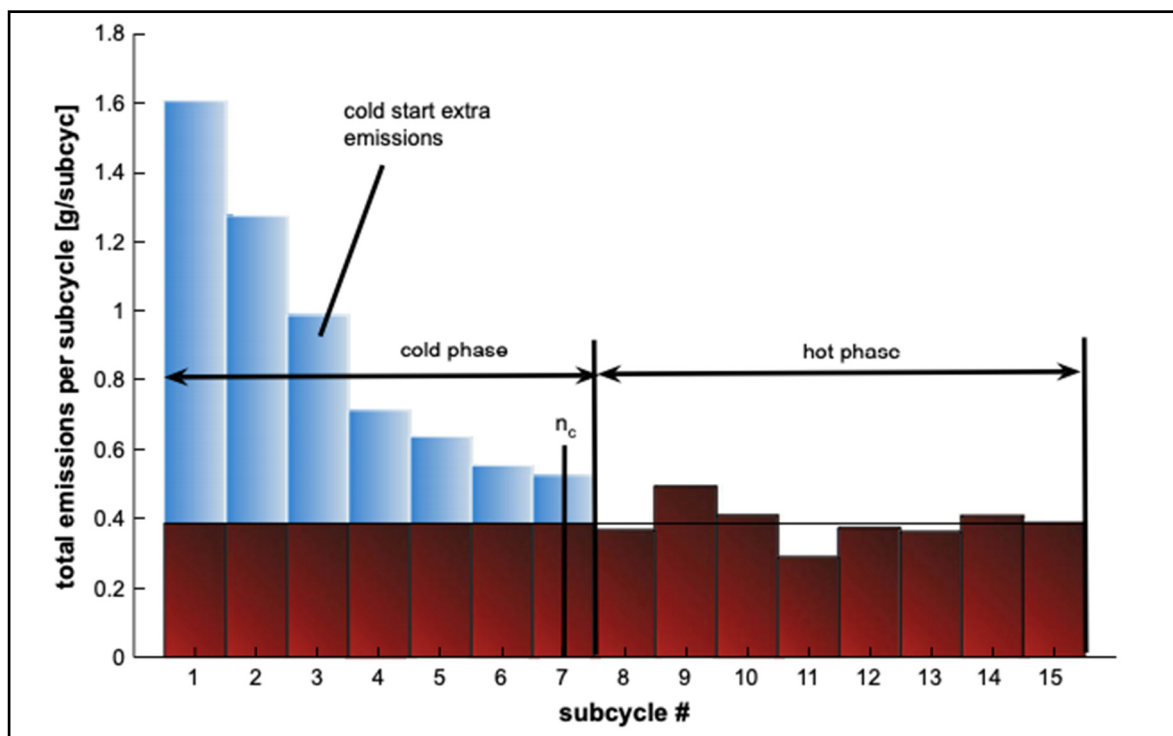


Figure 1.6: Évolution des émissions en fonction du sous-cycle (Weilenmann et al. 2009)

Le fonctionnement à chaud, entre autres, n'a pas un impact majeur sur la quantité de GES calculée avec l'approche des ventes de carburant, c'est sur l'approche Ascendante qu'il a le plus d'influence en impactant les facteurs d'émissions.

1.2.1.3 Test au laboratoire

On trouve plus fréquemment des laboratoires avec des installations de pointe à température contrôlée permettant de réaliser des tests d'émissions, de consommation de carburant et de performances sur une large gamme de cycles de conduite et une large gamme de conditions ambiantes. Ces laboratoires, comme le laboratoire BOSMAL en Pologne montré dans la figure 1.7, permettent l'optimisation des estimations des émissions des véhicules.

La collecte de données dans ces environnements contrôlés peut fournir les résultats d'estimation d'émissions les plus fiables, mais pas les plus réalistes et conformes à la situation réelle. Les essais faits dans les laboratoires permettent de vérifier si un modèle de véhicule est conforme aux normes d'émissions qui deviennent de plus en plus strictes. Il s'agit d'une phase très importante qui peut conduire à une estimation d'émissions territoriale précise à condition qu'elle soit soutenue par un calcul approximatif d'activités fiable.



Figure 1.7: Exemple d'un laboratoire de test d'émissions
(Bielaczyc et al. 2011)

Les tests au laboratoire confirment que les différentes caractéristiques du véhicule comme la forme, la zone frontale et la vitesse, en plus de la densité de l'air et la vitesse du vent, sont les principales composantes influençant la traînée aérodynamique. Cette dernière est responsable d'une grande partie de la demande en énergie d'un véhicule et par la suite, de la consommation de carburant.

Dans le transport urbain, tout ce qui s'ajoute à la puissance requise pour se déplacer ou pour vaincre une résistance, comme la résistance au roulement, est considéré comme un auxiliaire ; c'est le cas de la climatisation, l'éclairage, le chauffage électrique, les essuie-glaces, etc. Les auxiliaires puisent dans la puissance du moteur et contribuent donc à la consommation de carburant. L'un des plus importants, en ce qui concerne la consommation de carburant, est la climatisation, son impact significatif sur la consommation de carburant a été reconnu par (Barbusse, Clodic, et Roumégoux 1998).

1.2.1.4 Autres facteurs

La section suivante présentera les facteurs à grande échelle, notamment l'étalement urbain. En relation avec ce facteur, mais à plus petite échelle, la texture et l'état de la route influencent l'énergie dissipée par les véhicules : il existe de nombreuses études sur l'impact de l'interaction des chaussées et des pneus sur la consommation de carburant, principalement axées sur l'impact de la texture de la chaussée. La dissipation d'énergie et la consommation de carburant sont principalement nécessaires pour surmonter la résistance au roulement provoqué par les caractéristiques de la chaussée.

La résistance au roulement est aussi appelée "pertes d'énergie par distance parcourue par le véhicule en raison de déformations non élastiques des pneus et de pertes dans le système de suspension des roues" (Andersen Lasse G. et al. 2015). Il est probable qu'en fonction de la vitesse du véhicule, la résistance au roulement puisse être responsable de 20 à 30 % de la consommation de carburant (Boere 2014). Il existe plusieurs facteurs qui peuvent affecter la

résistance au roulement et donc, la consommation d'énergie et de carburant : la texture de la route, les propriétés des matériaux des pneus, la pression de gonflage des pneus, la température, le poids du véhicule, la vitesse du véhicule et l'état des routes.

1.2.2 Paramètres affectant les émissions à l'échelle urbaine (macro-échelle)

1.2.2.1 Croissance démographique et aménagement territorial

Le Canada et le Québec sont vastes et leur population est éparpillée, ce qui entraîne des temps de déplacements relativement plus importants et une demande de transport plus élevée que dans les pays plus petits ou densément peuplés. De plus, parmi les pays du G7, la croissance démographique du Canada a été la plus rapide entre 2005 et 2017 et son économie, basée sur les ressources, a présenté la plus forte croissance en 2017 (Canada 2017).

Parmi les préoccupations poussant vers une meilleure gestion de l'urbanisation, la réduction des émissions de gaz à effet de serre est relativement nouvelle, mais elle vient s'ajouter à un ensemble d'autres enjeux. En effet, le développement urbain conduisant à l'augmentation des déplacements motorisés, entraîne l'émission de grandes quantités de gaz à effet de serre. Il est donc très important d'accroître l'accessibilité, avec des déplacements réduits et moins polluants, entre les lieux de résidence, de travail, de consommation et d'autres types d'activités. Dans cette optique, les interventions d'aménagement du territoire sont nécessaires pour réduire les émissions de GES (Pierre Blais 2004).

De plus, on considère que l'innovation technologique et la conception de nouveaux véhicules moins polluants représentent aussi d'intéressantes possibilités de réduction des émissions de GES. Par contre, l'innovation technologique ne concourt pas à diminuer les problèmes de congestion routière ainsi que ceux, plus globaux, liés à l'étalement urbain. Pour réduire les émissions de GES, il est donc préférable de privilégier à la fois des mesures d'aménagement

du territoire et d'innovation technologique, et non pas de s'appuyer uniquement sur ces dernières. (Pierre Blais 2004)

1.2.2.2 Le transport actif et le transport en commun

On peut certainement considérer que le transport actif remplace, au moins en partie, les déplacements motorisés et réduit ainsi la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre associées. En effet, le remplacement des déplacements motorisés par des modes de transport à faible teneur en carbone, tels que la marche et le vélo, est de plus en plus reconnu comme un élément important des stratégies de réduction de la demande en énergie et des émissions de carbone (Brand, Goodman, et Ogilvie 2014). Dans plusieurs pays, la majorité des trajets effectués en voiture sont des trajets de courte distance pour se rendre au travail, à l'école ou faire des achats. Au Royaume-Uni, par exemple, environ un cinquième des émissions de dioxyde de carbone et de l'énergie utilisée pour le transport proviennent de trajets en voiture de moins de huit kilomètres qui pourraient être effectués à pied ou à vélo (Grande-Bretagne et Department for Transport 2009). L'hypothèse selon laquelle le transport actif réduit les émissions de GES est largement étayée par les conclusions selon lesquelles l'accès à la bicyclette est en corrélation négative avec les émissions de CO_2 des déplacements motorisés (Brand et al. 2013) et que les dépenses énergétiques liées à la marche sont en corrélation négative avec l'utilisation de combustibles fossiles par la voiture (Frank et al. 2010).

Au Québec, les municipalités qui sont appuyées par des groupes de défense des cyclistes et par des organismes environnementaux et de développement intelligent se sont mises à élaborer des stratégies à long terme pour le transport actif. L'intégration des transports actifs et des transports en commun est une mesure vitale de l'essor des transports actifs, puisque cela offre aux citoyens plus d'options pour réduire l'utilisation de leur véhicule. En effet, des supports à bicyclettes ont été installés sur les autobus. Des stationnements sûrs et sécurisés pour les vélos ont également été aménagés aux principaux arrêts et dans les gares de transport en commun. De nombreuses villes, petites villes et sociétés de transport en commun collaborent pour

améliorer les passerelles pour les piétons à destination des gares de transport en commun et/ou offrent des aménagements pour les piétons aux arrêts des transports en commun (Transports Canada 2011).

1.2.2.3 Les aléas climatiques

Les événements météorologiques sont des facteurs importants qui peuvent influencer les décisions des citoyens envers les moyens de transport qu'ils utilisent. Les conditions climatiques sévères, comme les tempêtes de neige en hiver ou les températures extrêmes en été, constituent des risques majeurs qui touchent les infrastructures urbaines, l'ensemble des réseaux routiers et la résilience des Montréalais.

En effet, les impacts des changements climatiques sur les infrastructures ne peuvent pas être examinés séparément des autres facteurs (sociaux, politiques, culturels, environnementaux et économiques) qui influencent l'utilisation et la gestion des infrastructures. La reconnaissance des vulnérabilités locales et globales du système de transport québécois est nécessaire pour développer des outils et des mesures d'adaptation pertinentes qui contribuent à maintenir l'état des infrastructures et les opérations de transport. De plus, à Montréal, le cadre bâti et certaines infrastructures de transport atteignent leur déclin ou nécessitent des travaux de réhabilitation considérables. La conception, mais aussi tous les aspects d'opération, d'entretien, de gestion et de réhabilitation, sont et seront affectés par les changements climatiques (Breton, M.-P., Cloutier, G., et Waygood, E.O.D 2017).

En plus de l'influence sur les décisions envers les moyens de transport, ces facteurs climatiques peuvent affecter la consommation de carburant selon les deux modes abordés précédemment : le démarrage à froid et le fonctionnement à chaud. Dans les climats froids, comme à Montréal, la température peut descendre jusqu'à -30 °C, ce qui rend l'impact du démarrage à froid plus important que dans les régions plus chaudes. L'impact de la climatisation, pendant le fonctionnement à chaud, dans les périodes de hautes températures est aussi considérable.

L'ensemble de ces paramètres influencent les activités sur les réseaux routiers et la consommation du carburant par l'ensemble de la flotte des véhicules commerciaux et privés, et par la suite cela entraîne une variation des émissions des gaz à effet de serre du secteur du transport routier.

1.3 Outils disponibles pour estimer les activités dans une approche Bottom-Up

Cette section présente un aperçu des différentes sources de données d'activités disponibles pour estimer les kilomètres parcourus afin d'améliorer la quantification des gaz à effet de serre du transport urbain. Ces sources de données pourraient permettre l'augmentation de la résolution spatiale et temporelle de l'inventaire et la réduction des incertitudes liées au calcul d'activités routières (kilomètres parcourus) générées par la méthodologie basée sur la vente de carburants (Descendante) présentée dans une section précédente. La résolution spatiale et temporelle va aussi permettre d'analyser l'effet des facteurs affectant les émissions à macro-échelle sur l'inventaire urbain.

1.3.1 Enquête Origine/Destination

L'enquête Origine/Destination (EOD) collecte de l'information sur un pourcentage de l'ensemble des déplacements effectués au cours d'une journée de semaine en automne dans la région métropolitaine de Montréal et ses environs. Les participants, sélectionnés au hasard, ont été interrogés sur les caractéristiques de leur ménage et des personnes qui les composent, ainsi que sur les caractéristiques de tous les déplacements réalisés par chacun des membres du ménage. Cette enquête est menée historiquement par des entrevues téléphoniques tous les cinq ans et, depuis 2018, à partir de questionnaires web. Il s'agit de la plus vaste enquête sur la mobilité au Québec. Les caractéristiques des quelques 360 000 déplacements effectués sur le territoire de la région Métropolitaine de Montréal sont utilisées à plusieurs fins, dont la planification des projets d'infrastructures envisagés pour le réseau (Autorité régionale de transport métropolitain 2018).

Les données tirées de l'EOD seront utilisées par plusieurs organismes de transport collectif et de mobilité afin de mieux définir les besoins de mobilité et de planifier les grands projets de transport. De ce fait, les données peuvent servir à mieux quantifier les émissions des GES qui proviennent du secteur routier. En fait, l'ensemble des informations collectées des citoyens comporte l'arrondissement ou la municipalité de départ et d'arrivée et les moyens de transport pris durant leurs déplacements. Sachant que ces données sont pondérées et représentatives de la population, les distances parcourues vont servir à estimer l'activité de l'ensemble de la flotte sur les réseaux routiers dans un an.

La période d'échantillonnage est l'une des faiblesses de l'utilisation de cette méthodologie pour estimer les émissions GES. Les habitudes de déplacement sont généralement plus stables à l'automne ou au printemps. C'est la période durant laquelle l'enquête est faite tous les cinq ans. La stabilité des conditions démographiques et météorologiques de la période élimine toute sorte de variabilité de quantité de déplacement, avec un moyen de transport ou un autre, qui peut être enregistrée durant les périodes de froid ou de chaleur extrême, en cas de smog ou de tempêtes de neige, etc. Ceci nous empêche aussi de bien estimer les émissions puisqu'on a seulement une journée de semaine à l'automne dans des conditions météorologiques uniques. Une autre limite que cet outil présente concerne les trajets des participants que l'on ne connaît pas exactement. On connaît seulement les zones de départ et la zone d'arrivée du déplacement qui sont à l'échelle d'un arrondissement pour la Ville de Montréal ou d'une municipalité pour les banlieues, voire parfois un ensemble de municipalités. Ceci aura par conséquent un impact sur les incertitudes quant au calcul des kilométrages parcourus.

1.3.2 TELUS Insights

TELUS Insights est un outil logiciel développé par la compagnie canadienne de télécommunication TELUS. Cet outil utilise une approche avancée de l'analyse des grandes données (Big data). Il fonctionne avec des ensembles massifs de données identifiées et agrégées provenant continuellement des appareils mobiles des clients, donnant ainsi des

informations précises sur leurs déplacements et leurs caractéristiques. TELUS a une grande part dans le marché des télécommunications, ce qui est très bénéfique pour que l'échantillon provenant de cet outil soit représentatif de la population. De plus, grâce à des normes de protection de confidentialité, TELUS extrapole ces informations dans de grands ensembles de données afin de révéler les modèles et les tendances des mouvements individuels. (TELUS s. d.)

L'utilisation des données fournies par TELUS Insights pour enregistrer les mouvements de population sur l'île de Montréal afin de fournir des estimations précises de la contribution du secteur des transports aux émissions de GES est très intéressante, mais cela présente quelques limites. Cet outil ne peut pas donner avec exactitudes les moyens de transport utilisés par la population, ni les modèles ou les types de véhicules circulant sur les réseaux routiers de la ville. Ceci peut influencer l'utilisation du modèle de quantification des émissions de GES de l'approche Ascendante. En plus des limites par rapport au contenu, l'acquisition de ces données est extrêmement coûteuse, même pour une seule semaine d'activités routières, laquelle ne serait d'ailleurs pas suffisante pour confirmer nos hypothèses et notre méthodologie.

1.3.3 L'application MTL Trajet

MTL Trajet est une application mobile développée par la Ville de Montréal et l'Université Concordia pour enregistrer les déplacements (données GPS), ainsi que les temps de parcours des participants sur une base volontaire pour une période déterminée. Cette application utilise un algorithme pour l'identification du début et de la fin des trajets effectués par les utilisateurs. Une fois la fin du parcours détectée, elle envoie une notification qui demande la raison du déplacement à l'utilisateur, ainsi que le mode de transport utilisé (Figure 1.8).

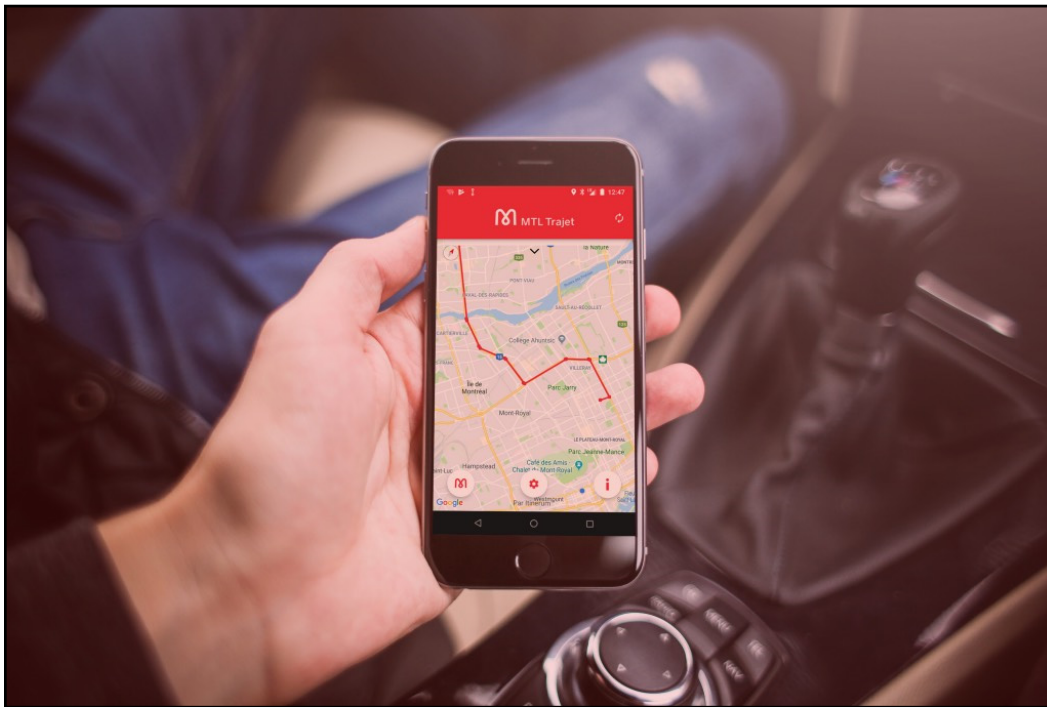


Figure 1.8: Interface utilisateur de l'application MTL Trajet

MTL Trajet a été développée pour déployer tous les efforts nécessaires afin d'améliorer la mobilité des usagers, tous modes de transport confondus. Elle représente l'une des nombreuses mesures adoptées pour faciliter les déplacements à Montréal (La Ville de Montréal 2017). Les études réalisées les années précédentes ont permis de collecter des données utiles permettant de mesurer l'impact des travaux de construction, de calculer les temps de parcours ou de coordonner les feux de circulation.

L'un des principaux avantages est que la collecte des données de déplacements se fait en temps réel. Cette fonctionnalité peut donc permettre de tester et de quantifier l'efficacité réelle des mesures de réduction d'émissions de GES.

CHAPITRE 2

OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

Les différentes juridictions municipales, incluant la Ville de Montréal, produisent des inventaires d'émissions de GES suivant les lignes directrices du document méthodologique « Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories », afin de quantifier les émissions des différents secteurs et de suivre leur évolution, d'année en année, dans l'agglomération de Montréal. Les émissions de GES sont présentées en fonction de cinq secteurs d'activités : les sources fixes, le transport, les matières résiduelles, les procédés industriels et l'utilisation de produits (PIUP) et l'agriculture, la foresterie et autres affectations des terres (AFAT) (La Ville de Montréal 2019). Pour le secteur du transport routier, la méthodologie utilisée est celle des ventes de carburant sur le territoire montréalais. Les données de vente pour l'agglomération de Montréal sont tirées du Portrait du marché québécois de la vente au détail d'essence et de carburant diesel de la Régie de l'énergie du Québec (Ministère de l'Environnement et de la lutte contre les changements climatiques, 2019), puis ces quantités vendues sont multipliées par des coefficients d'émissions de GES moyens estimés. Cette approche est appelée Descendante. Sa limite réside principalement dans le fait que non seulement la quantité de carburant vendue peut être utilisée dans des secteurs autres que le transport routier, mais aussi que ces quantités peuvent être facilement brûlées en dehors de la région de l'agglomération de Montréal. Il convient aussi de mentionner qu'en se basant sur cette méthodologie, l'inventaire de la collectivité montréalaise de 2015 a été publié en 2019 et ne possède aucune résolution spatiale ni temporelle. Ce retard et ce manque de résolution nous empêche de tester, en temps presque réel, l'efficacité des mesures et des politiques mises en place pour la réduction des émissions de GES. Il existe des approches Ascendante qui sont plus compliquées à mettre en place, car elles demandent d'inventorier toutes les activités (kilomètres parcourus sur le territoire), puis de multiplier par des cotes de consommations de carburant, puis par des facteurs d'émission de GES. Bien que cette approche réduise les incertitudes liées à la méthodologie de vente de carburant et nous permette d'avoir un inventaire avec une résolution spatiale et temporelle améliorée, elle présente des limites autres que sa complexité de mise en place. Dans les calculs, on ne prend pas en considération les

différents facteurs à micro-échelle qui influencent les émissions des GES, comme l'état des chaussées, la vitesse des véhicules, la résistance au roulement, etc.

À Montréal, les juridictions au niveau provincial et fédéral ont toujours utilisé une approche basée sur les ventes de carburant. Une approche « Bottom-Up » aurait l'avantage de présenter un portrait beaucoup plus détaillé des émissions liées au transport en améliorant la résolution spatiale et temporelle et en permettant de comprendre l'effet de différents facteurs sur les émissions comme les aléas climatiques, la mise en place de mesures d'atténuation du trafic, l'étalement urbain, etc. Ceci aiderait à développer de meilleurs plans d'action contre les changements climatiques. Différentes sources de données ont été identifiées afin d'estimer les données d'activités (kilomètres parcourus). Dans ce projet, nous allons explorer les manières dont l'application MTL Trajet pourrait être utilisée à cette fin. Ce chapitre présente les objectifs et la méthodologie complète permettant l'estimation des émissions de GES du transport routier par une approche Ascendante à l'aide des données de l'application MTL Trajet. Ce projet a été réalisé avec l'appui du Service du développement économique de la Ville de Montréal, en collaboration avec le Bureau de la transition écologique et de la résilience, et a fait l'objet d'un rapport remis en février 2020.

2.1 Objectifs

En adoptant l'approche Ascendante, plusieurs variables qui entrent dans le calcul des émissions doivent être prises en compte : l'activité routière (km), la cote de consommation de carburant des véhicules (L/km) et les facteurs d'émissions de GES (g/L). Le calcul de l'activité routière est l'étape la plus importante de l'estimation des émissions, puisque la plus grande partie de l'incertitude provient de cette étape cruciale, tout comme l'expression de la résolution temporelle et spatiale. De plus, les facteurs qui influencent la dissipation des GES les plus difficiles à quantifier sont celles qui ne sont pas liées aux spécifications techniques des véhicules ni à des expériences réalisables dans des laboratoires comme les aléas climatiques. Ceci fut l'objet de notre collaboration avec la Ville de Montréal et présente ainsi un autre aspect de notre projet.

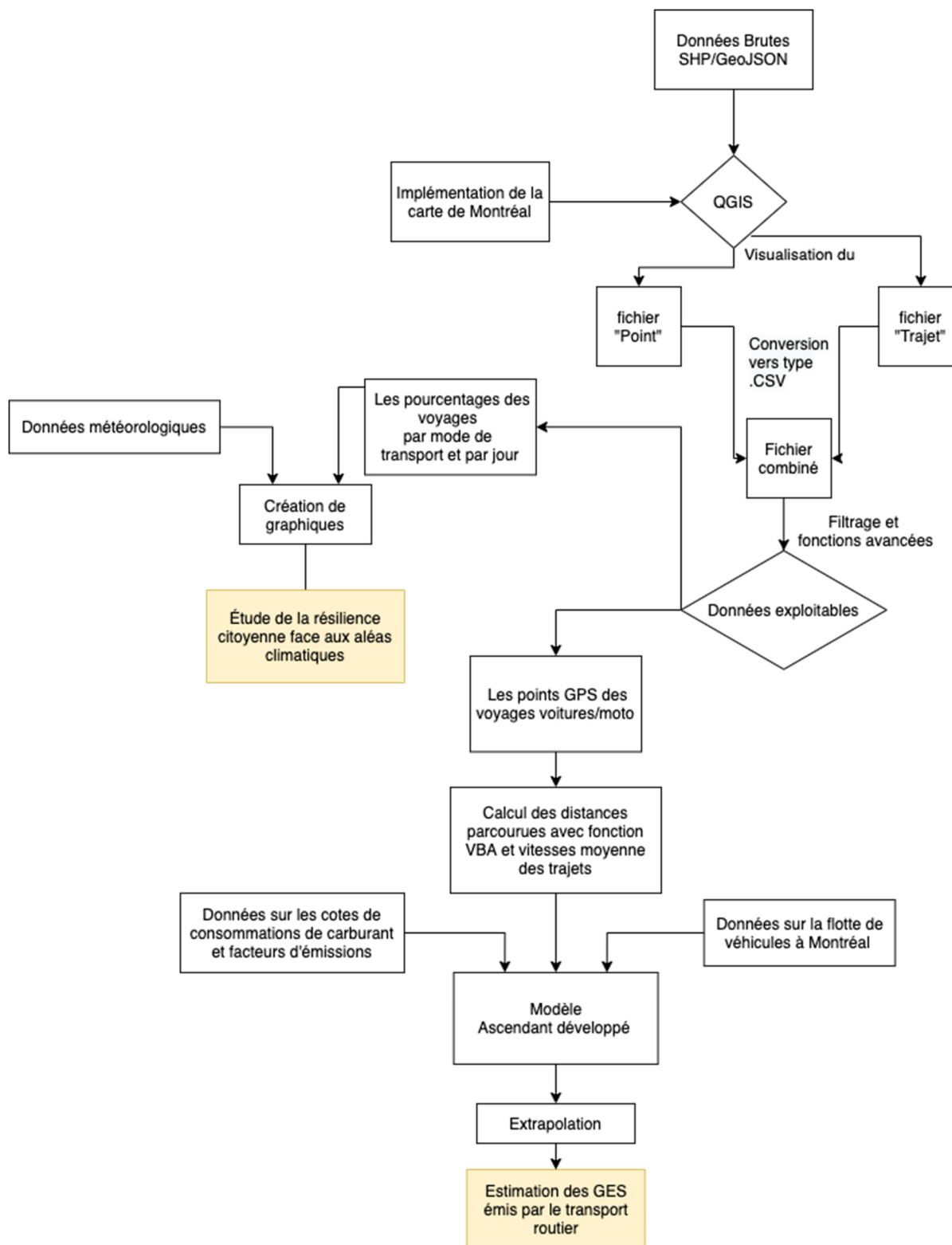
L'objectif principal de cette étude est de développer une méthodologie suivant une approche Ascendante pour quantifier les émissions de GES du transport routier sur le territoire de l'agglomération de Montréal. Pour ce faire, trois objectifs spécifiques, qui se traduiront en trois grandes étapes méthodologiques, ont été identifiés :

1. Déterminer les distances et les trajets parcourus à l'aide de différents modes de transport par les utilisateurs de l'application MTL Trajet.
2. Étudier l'impact de différents facteurs sur les déplacements des utilisateurs (par exemple, les conditions météorologiques, les heures de pointe, les jours de fin de semaine, etc.)

Calculer les émissions de GES annuelles du secteur du transport routier pour l'agglomération de Montréal à partir des distances estimées à l'objectif spécifique 1.

2.2 Méthodologie

Afin de concrétiser les objectifs de notre recherche, on va suivre une méthodologie précise qui se résume dans l'organigramme suivant :



2.2.1 Traitement de données de MTL Trajet

2.2.1.1 Justification du choix de la source de données

Trois sources potentielles de données géographiques à haute résolution temporelle ont été étudiées, à savoir l'enquête Origine/Destination (EOD), TELUS Insights et MTL Trajet. Tout d'abord, il a fallu éliminer le choix de l'EOD puisque cet outil ne procure pas des données de distances exactes et que ces informations de déplacement s'étendent sur une journée dans l'année une fois tous les cinq ans. Les deux autres outils nous permettent de manipuler des données de distances plus précises et plus récentes.

La technologie TELUS Insight tire d'importantes quantités de données sur le positionnement en temps réel des téléphones connectés au réseau mobile de TELUS lorsque les gens se déplacent et que leurs appareils mobiles se connectent à diverses tours cellulaires. Le point faible de cet outil est qu'il ne fournit pas exactement les moyens de transport pris par l'utilisateur. TELUS peut, toutefois, les déduire avec une forme d'intelligence artificielle et avec certaines limites (par exemple, la vitesse des véhicules pris dans la congestion peut être la même que celle d'un cycliste etc.). L'autre option est l'application développée par la ville de Montréal, MTL Trajet. Cette application fonctionne durant un mois chaque année et collecte les données GPS des utilisateurs qui se portent volontaires. La collecte des données GPS se fait seulement sur une semaine. Contrairement à l'outil logiciel de TELUS, l'échantillon de MTL Trajet n'est pas aussi représentatif de la population et aucune pondération n'est appliquée. Cependant, l'avantage considérable de cette application, par rapport à TELUS Insights, est que les utilisateurs sont invités à remplir leurs modes de transport pris pour les déplacements.

Notre choix a été confirmé suite à nos rencontres avec TELUS puisqu'il s'est avéré que le prix des données de TELUS Insights est trop élevé, même pour une courte durée de couverture, d'où l'impossibilité de les exploiter pour notre projet de quantification d'émissions de GES.

Par contre, il serait intéressant d'explorer ces données dans si leur accès était plus aisé. Nous avons donc choisi d'utiliser les données de l'application mobile MTL Trajet.

Les données les plus récentes de l'application MTL Trajet disponibles sont celles de l'année 2017, plus précisément pendant la période du 18 septembre au 18 octobre 2017. Grâce à cette application, 477 000 trajets ont été enregistrés et plus de 21 000 000 points GPS ont été générés. Les données ouvertes publiées par la Ville de Montréal sur le site officiel (<http://donnees.ville.montreal.qc.ca/dataset/mtl-trajet>) sont des données GeoJSON et Shape files qui représentent des caractéristiques géographiques simples, ainsi que leurs attributs non spatiaux. Ce sont des données vectorielles géo spatiales qui ne peuvent être exploitées qu'avec des logiciels de systèmes d'information géographique (GIS).

2.2.1.2 Le logiciel QGIS

QGIS est un système d'information géographique (GIS) ouvert et sous licence GNU « General Public License ». Le développement du logiciel a commencé en 2002 par Gary Sherman et il est devenu un projet incubateur de « Open Source Geospatial Foundation (OSGeo) » (Phillip Davis 2016). Ce logiciel prend en charge la visualisation, l'édition et l'analyse des données géo spatiales. Ces dernières sont exactement le type de données fournies par l'application MTL Trajet.

2.2.1.3 L'implémentation des données

Au lancement de QGIS, on crée un nouveau projet (menu projet/new). Les données de types SHP téléchargées du site de MTL Trajet sont des données vectorielles. Afin de les exploiter sur le logiciel, on clique sur « Layer », puis on ajoute un « Vector Layer » et dans les fenêtres qui s'affichent, on choisit les paramètres convenables à nos fichiers pour ensuite confirmer leur implémentation sur QGIS comme le montre la figure 2.1.

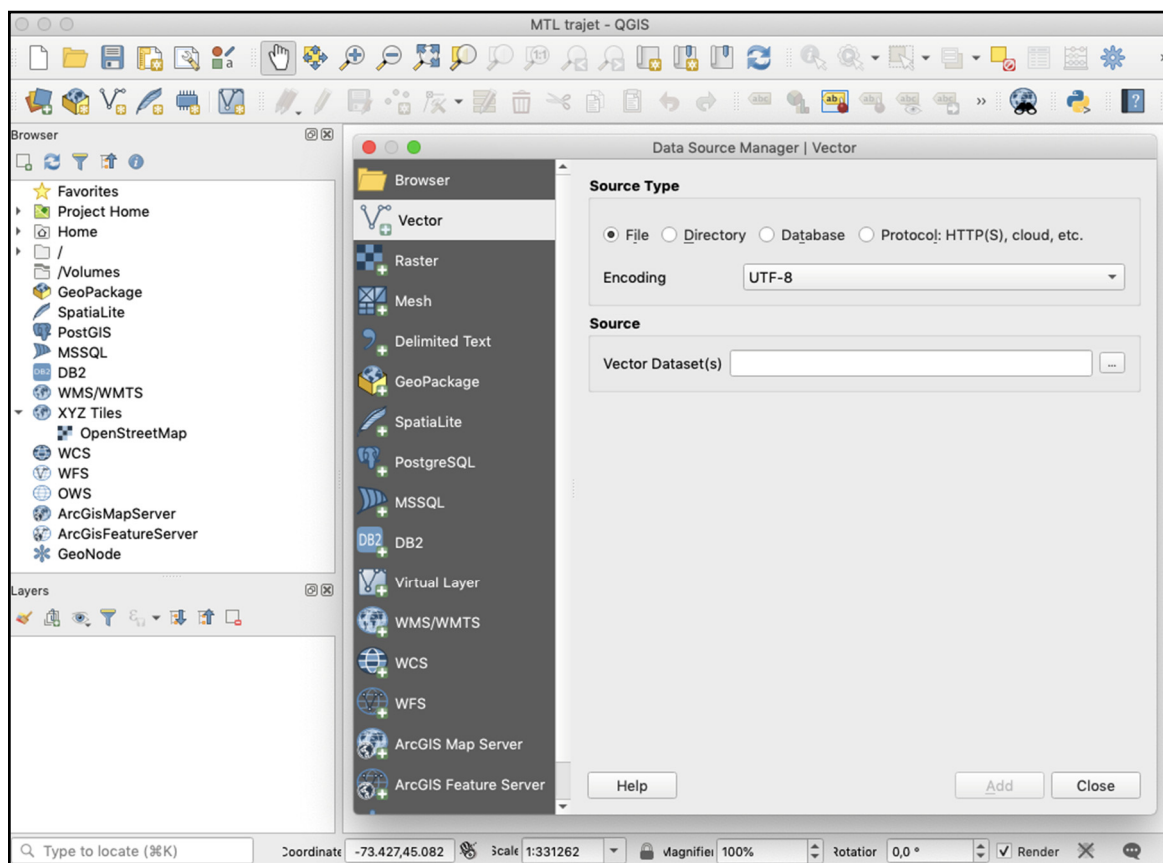


Figure 2.1: Paramétrage du QGIS pour ajouter une couche vectrice « Vector Layer »

Avant d'ajouter la couche des données vectorielle de l'application, il faut préparer la couche sur laquelle ces informations vont être disposées sur l'interface du logiciel. Préalablement, nous savons que nous travaillons avec des fichiers qui contiennent des données GPS des utilisateurs de l'application qui sont en grande majorité situés dans la région métropolitaine de Montréal. De ce fait, nous avons préparé la carte de la Ville de Montréal sur le logiciel pour qu'elle supporte les données implémentées.

2.2.1.4 La visualisation des données

Les données de MTL Trajet sont réparties dans deux fichiers : « Trajets » et « Points ». Le fichier « Trajets » nous donne des représentations géographiques sous forme de lignes

continues sur la carte de Montréal. Ces différentes lignes représentent les chemins parcourus par l'ensemble de la population participant à cette étude (Figure 2.2). Nous remarquons que les trajets parcourus par les utilisateurs de l'application sont répartis sur toutes les routes de l'île de Montréal et sur d'autres routes à l'extérieur de cette région.

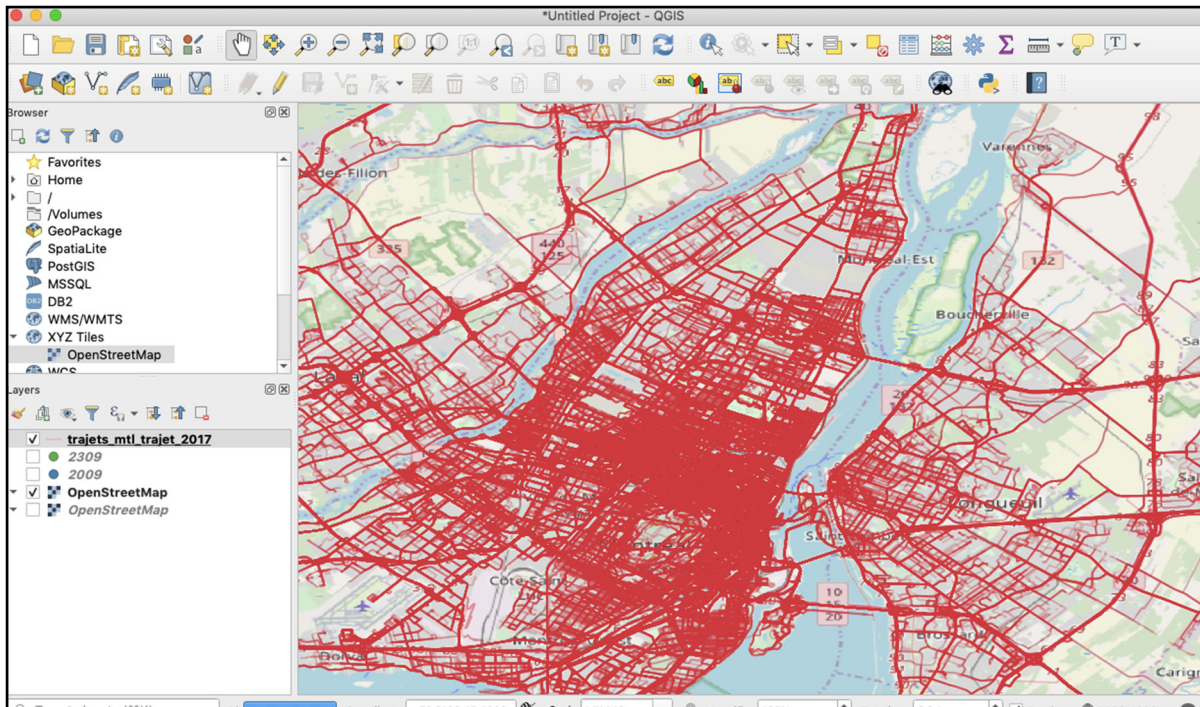


Figure 2.2 : Représentation GIS globale du fichier « Trajets »

Le fichier « Points » nous donne des représentations géographiques sous forme de points sur la carte de Montréal. Ces différents points représentent les positions GPS des utilisateurs à différents moments de leurs déplacements (Figure 2.3).

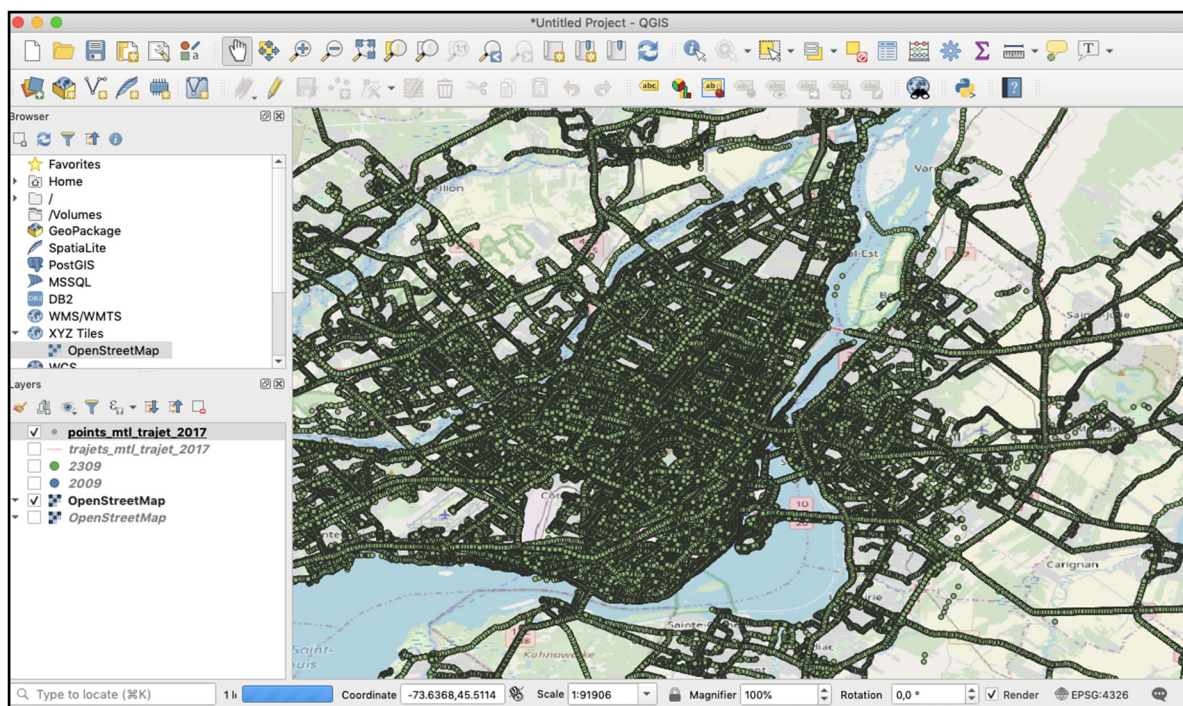


Figure 2.3 : Représentation GIS globale du fichier « Points »

2.2.1.5 Extraction et conversion des données

Les données géographiques ont été converties en format Excel afin de pouvoir les analyser. Le fichier « Trajets » est constitué de l'identifiant du déplacement (id_trip), du mode de transport utilisé (mode), de la raison du déplacement (purpose) et de la durée du déplacement (starttime, endtime, elapsed time) (Figure 2.4). Malheureusement et comme le montre cette figure, plusieurs participant à l'échantillonnage d'MTL trajet n'ont pas confirmé leurs modes de transport utilisés. Par contre on enregistre 4961 voyages et 109794 points GPS avec modes de transports confirmés et identifié, ce qui est largement suffisant pour accomplir notre recherche.

	A	B	C	D	E	F
1	id_trip	mode	purpose	starttime	endtime	elapsed time
2	0	À pied, Transport colle	Retourner à mon domicile	13/10/2017 16:39	13/10/2017 21:08	04:29:00
3	2			25/09/2017 11:57	25/09/2017 13:02	01:04:53
4	4	Transport collectif	Retourner à mon domicile	12/10/2017 20:50	12/10/2017 22:41	01:50:20
5	6	À pied, Transport colle	Retourner à mon domicile	13/10/2017 16:56	13/10/2017 17:07	00:11:18
6	7	Transport collectif	Santé	27/09/2017 13:39	27/09/2017 13:49	00:10:09
7	10			07/10/2017 23:20	07/10/2017 23:33	00:13:32
8	12			17/10/2017 18:48	17/10/2017 18:58	00:10:11
9	13	Voiture / Moto	Retourner à mon domicile	01/10/2017 04:41	01/10/2017 04:58	00:17:50
10	19			26/09/2017 23:58	27/09/2017 00:08	00:09:35
11	20			12/10/2017 16:42	12/10/2017 16:47	00:05:06
12	21	À pied	Reconduire / aller chercher une pe	25/09/2017 22:02	25/09/2017 22:12	00:09:40
13	22	Transport collectif	Travail / Rendez-vous d'affaires	04/10/2017 11:34	04/10/2017 12:16	00:42:14
14	26			06/10/2017 12:38	06/10/2017 13:23	00:45:16
15	27	Vélo	Retourner à mon domicile	02/10/2017 19:28	02/10/2017 19:59	00:31:08
16	30	Vélo	Retourner à mon domicile	30/09/2017 14:37	30/09/2017 14:48	00:11:25
17	32			29/09/2017 00:04	29/09/2017 00:09	00:04:47
18	33			20/09/2017 00:11	20/09/2017 00:23	00:11:40
19	34			14/10/2017 16:17	14/10/2017 16:30	00:12:39
20	36			12/10/2017 01:37	12/10/2017 01:49	00:11:46
21	38			13/10/2017 19:20	13/10/2017 19:20	00:00:39
22	42			24/09/2017 18:32	24/09/2017 19:06	00:34:01
23	45	Vélo	Retourner à mon domicile	25/09/2017 12:12	25/09/2017 12:47	00:34:54
24	46			14/10/2017 16:24	14/10/2017 17:26	01:02:33
25	51	Voiture / Moto	Retourner à mon domicile	08/10/2017 05:14	08/10/2017 05:24	00:09:17
26	53			22/09/2017 21:33	22/09/2017 21:48	00:14:24
27	54			06/10/2017 20:49	06/10/2017 20:52	00:02:42
28	56			30/09/2017 11:28	30/09/2017 12:14	00:46:21

Figure 2.4 : Composition du fichier « Trajets »

Le fichier « Points » contient les coordonnées géographiques (latitude, longitude) en fonction de l'identifiant du déplacement (Figure 2.5). Ce fichier contient aussi les vitesses de déplacement en mètre par seconde (speed) et d'autres informations comme le niveau de précision des valeurs horizontale et verticale de la position GPS (h_accuracy et v_accuracy) et l'horodatage des points GPS (timestamp).

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	latitude	longitude	speed (m/s)	altitude	h_accuracy	v_accuracy	timestamp	id_trip
2	45,547262	-73,547435	1,71	16,329102	5	3	20/09/2017 00:13	33
3	45,547048	-73,547564	1,44	15,834961	5	3	20/09/2017 00:14	33
4	45,546846	-73,547712	1,63	15,392059	5	3	20/09/2017 00:14	33
5	45,546643	-73,547888	1,66	16,226257	5	3	20/09/2017 00:14	33
6	45,546519	-73,548172	1,51	17,056972	5	3	20/09/2017 00:15	33
7	45,546292	-73,54823	1,65	16,941636	5	3	20/09/2017 00:15	33
8	45,546093	-73,548398	1,23	18,247592	5	3	20/09/2017 00:15	33
9	45,545879	-73,548518	1,3	18,686602	5	3	20/09/2017 00:16	33
10	45,545656	-73,548577	1,29	18,990167	5	3	20/09/2017 00:16	33
11	45,545441	-73,548708	1,59	19,016913	5	3	20/09/2017 00:16	33
12	45,545343	-73,549001	1,28	18,825362	5	3	20/09/2017 00:16	33
13	45,545432	-73,549302	1,16	22,699994	5	3	20/09/2017 00:17	33
14	45,54555	-73,549583	0,95	24,081331	5	3	20/09/2017 00:17	33
15	45,545674	-73,549857	1,12	23,990958	5	3	20/09/2017 00:17	33
16	45,545769	-73,550164	1,25	24,253382	5	3	20/09/2017 00:18	33
17	45,545893	-73,550432	1,25	24,988113	10	3	20/09/2017 00:18	33
18	45,545941	-73,550751	1,53	25,954348	10	3	20/09/2017 00:18	33
19	45,546042	-73,551039	1,3	26,884942	10	3	20/09/2017 00:19	33
20	45,546135	-73,55135	1,49	27,738516	10	3	20/09/2017 00:19	33
21	45,54614	-73,551676	0,22	28,394271	10	4	20/09/2017 00:20	33
22	45,546049	-73,551969	1,62	28,716299	10	3	20/09/2017 00:20	33
23	45,545844	-73,55212	2,8	28,907638	10	3	20/09/2017 00:20	33
24	45,546534	-73,603671	0,92	67,410065	10	3	24/09/2017 18:33	42
25	45,546621	-73,603969	0,99	66,898712	10	3	24/09/2017 18:33	42
26	45,546724	-73,604259	1,19	65,350189	10	3	24/09/2017 18:33	42
27	45,546852	-73,604541	0,98	59,996552	10	3	24/09/2017 18:34	42
28	45,546987	-73,604811	0,98	60,879974	10	3	24/09/2017 18:34	42
29	45,547111	-73,605088	1,21	59,913971	10	3	24/09/2017 18:34	42
30	45,547208	-73,605381	1,02	60,991852	10	3	24/09/2017 18:35	42
31	45,547324	-73,605674	1,02	62,069061	10	3	24/09/2017 18:35	42
32	45,547452	-73,60595	0,8	61,595428	10	3	24/09/2017 18:35	42
33	45,547595	-73,606203	1,36	62,488861	10	3	24/09/2017 18:36	42
34	45,547685	-73,606513	1,21	60,777374	10	3	24/09/2017 18:36	42
35	45,547815	-73,606792	1,28	61,872833	10	3	24/09/2017 18:36	42

Figure 2.5 : Composition du fichier « Points »

Le champ « id_trip », commun aux deux fichiers, nous permet de les combiner. Nous avons ensuite appliqué des filtres et utilisé des fonctions Excel avancées afin de manipuler les données brutes et de les transformer en des résultats exploitables. Ainsi, nous avons pu déterminer les vitesses moyennes de chaque mode de transport, les coordonnées GPS par mode de transport par jour, le nombre et le pourcentage des déplacements par mode de transport et par jour, etc.

Nous avons aussi créé des tableaux croisés dynamiques à partir des deux fichiers pour trier les nouvelles données et tracer des graphiques qui représentent l'évolution de certaines valeurs clés comme le pourcentage des déplacements par mode de transport en fonction du temps. Il faut noter que les données du fichier « Trajets » s'étendent sur un mois, soit du 18

septembre au 18 octobre 2017, tandis que les données du fichier « Points », notamment les positions GPS exactes, s'étendent sur une semaine seulement, soit du 18 septembre au 24 septembre 2017.

2.2.1.6 Étude des tendances à travers des graphiques

Afin de convertir ces données Excel brutes en des données exploitables et interprétables, nous allons visualiser les données sous forme de graphiques qui consistent à produire des images qui nous communiquent les relations entre les données représentées. Dans notre cas, les relations à mettre en valeur sont les pourcentages des modes de transport utilisés en fonction des jours du mois de l'échantillonnage. Ainsi, nous allons utiliser les données du fichier « trajet », puisque ce dernier s'étend sur un mois, ce qui augmente les chances de trouver des tendances et des conclusions.

Comme la figure 2.4 nous le montre, plusieurs utilisateurs n'ont pas enregistré leurs modes de transport. Ces données ne sont donc pas intégrées dans les représentations graphiques pour améliorer la lisibilité de ces derniers et pour que les résultats ne soient pas biaisés. En outre, nous augmenterons cette lisibilité en appliquant un filtre sur les combinaisons de modes de transport qui présentent des pourcentages très faibles par rapport à l'ensemble des modes de transport pris par les utilisateurs.

Ces étapes de tri et de filtre nous permettront non seulement de préparer les données adéquates pour la représentation graphique, mais aussi de déterminer les distances et trajets parcourus à l'aide de différents modes de transport par les utilisateurs de l'application MTL Trajet et surtout par les modes de transport routier sur lesquelles nous nous concentrons pour la quantification d'émissions de GES.

2.2.2 La résilience des citoyens envers le transport face aux aléas climatiques

La variabilité des conditions météorologiques à Montréal, caractérisées par la température, l'humidité, la vitesse et la direction du vent, la visibilité, la pression atmosphérique, le refroidissement éolien et les précipitations (brouillard, neige, pluie verglaçante, orages, etc.) peut influencer les émissions des véhicules tant à l'échelle micro qu'à l'échelle macro. L'exemple micro concerne le démarrage à froid qui dépend des conditions météorologiques et qui va affecter les consommations de carburant et les facteurs d'émission. Nous n'aborderons pas cet aspect-là dans le mémoire. L'exemple macro concerne la manière dont les conditions météorologiques affectent les habitudes de transport, donc les activités routières. Nous étudierons ce dernier à partir des données de MTL Trajet.

Dans notre projet, nous allons analyser l'effet des aléas climatiques sur la résilience des citoyens envers les modes de transport. Parmi nos hypothèses : le comportement des gens incluant les déplacements et le choix des moyens de transport utilisés varie selon les conditions météorologiques et par la suite ceci influence systématiquement les quantités de GES émis dans le secteur du transport. L'échantillon de l'application MTL trajet nous procure les pourcentages des modes de transport utilisés suivant chaque journée du mois de l'échantillonnage. En combinant ces données avec les données météorologiques propres à chaque journée de ce mois-ci, il est possible de conclure sur la validité de notre hypothèse.

2.2.2.1 Les données météorologiques

Un deuxième aspect de notre projet vise à confirmer que les habitudes de transport et donc, les émissions de GES, sont influencées par les conditions météorologiques. Les prévisions des modèles climatiques montrent une augmentation des journées avec des températures ou des niveaux de précipitations extrêmes à cause des changements climatiques. Ces conditions météorologiques extrêmes vont devenir un facteur encore plus important qui influencera les habitudes envers le transport. Il est probable qu'un certain nombre de Montréalais modifient leurs habitudes en abandonnant les modes de transport actif (vélo et marche) pour se tourner

vers la voiture ou le transport en commun. Notre projet vise aussi à analyser la résilience des citoyens face aux aléas climatiques et à comprendre l'impact potentiel sur les émissions de GES.

Afin d'étudier d'influence des aléas climatiques sur les habitudes de transport et les émissions de GES, nous avons créé un autre fichier qui contient les données historiques des conditions météorologiques. Ce fichier a été construit à partir du site du gouvernement du Canada (<https://climat.meteo.gc.ca/>) (Figure 2.6) et téléchargé en version CSV pour satisfaire l'homogénéité avec les données de l'application MTL Trajet. Il contient des données sur la température, l'humidité, la vitesse et la direction du vent, la visibilité, la pression atmosphérique, pendant la durée de la couverture temporelle de l'application.

← Mois précédent

2017 ▾ septembre ▾

Allez

Mois suivant →

Rapport de données quotidiennes pour septembre 2017

JOUR	Temp. max. °C 	Temp. min. °C 	Temp. moy. °C 	DJC 	DJR 	Pluie tot. mm 	Neige tot. cm 	Précip. tot. mm 	Neige au sol cm 	Dir. raf. max. 10's deg	Vit. raf. max. km/h 
01	10,6	9,1	9,9	8,1	0,0	M	M	60,3		2	52
02	10,2	6,5	8,4	9,6	0,0	M	M	6,2		35	69
03	18,4	7,2	12,8	5,2	0,0	M	M	0,0		24	56
04	16,8	6,6	11,7	6,3	0,0	M	M	7,6		11	48
05											
06	17,6	14,3	16,0	2,0	0,0	M	M	13,6		24	44
07	21,1	13,7	17,4	0,6	0,0	M	M	28,5		17	43

Figure 2.6: Composition du fichier des données météorologiques

L'ensemble de données de l'application MTL Trajet combiné avec les données météorologiques est utilisé afin d'expliquer comment la météo peut influencer les émissions de gaz à effet de serre en modifiant les habitudes de la population envers les moyens de transport. Pour étudier cela, nous nous intéresserons également à la visualisation des densités

spatiales sur le logiciel QGIS des utilisateurs de l'application, pendant les différentes journées de la semaine ou en fin de semaine. Nous ajouterons alors les données de températures et de précipitations sur un axe secondaire des graphiques présentant le pourcentage de différents modes de transport utilisés en fonction de la journée du mois afin d'étudier les tendances et possibles corrélations.

2.2.2.2 Représentation de la densité spatiale

Afin de visualiser la densité spatiale, les données GPS des utilisateurs par mode de transport par jour ont été extraites, chacun dans des fichiers séparés, et implémentés dans le logiciel QGIS. Le processus d'implémentation se fait en ajoutant le fichier contenant les données GPS du jour ou du temps et du mode approprié avec l'option « Add Delimited Text Layer ». Ensuite nous choisissons les paramètres géométriques qui correspondent à nos données comme le montrent la Figure 2.7.

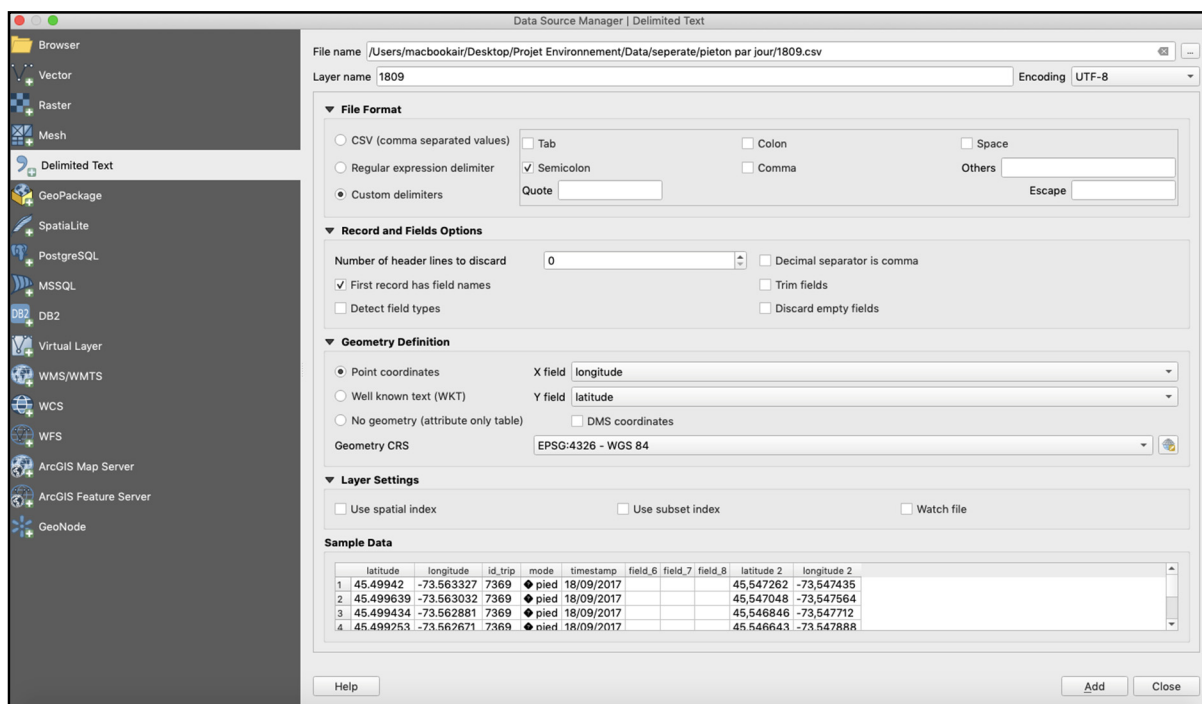


Figure 2.7 : Paramétrages du QGIS pour visualiser les densités spatiales

Les exemples qui suivent se concentrent sur les piétons et leurs comportements en fonction des jours de la semaine et des heures de pointe. Il est possible de réaliser ce genre d'analyse sur la densité spatiale des utilisateurs pour d'autres modes de transport (voiture/moto, transport collectif, vélo, etc.). Nous en donnons un exemple à la section 3.3.2.

2.2.3 Méthodologie de calcul des émissions de GES du transport routier

En se basant sur la méthodologie Bottom-Up, notre approche consiste à convertir les déplacements (km) sur les réseaux routiers en des émissions de gaz à effet (g) des trois gaz principaux émis par la consommation de carburant automobile, à savoir le dioxyde de carbone CO_2 , le méthane CH_4 et l'oxyde nitreux N_2O . Nous utiliserons des paramètres intermédiaires comme les taux de consommation de carburant (L/km) et les facteurs d'émissions (g/L). L'équation générale suivante représente notre approche de calcul d'émissions de GES :

$$GES (g) = \text{Activités routières (km)} * \text{taux de consommation de carburant (L/km)} * \text{facteur d'émissions (g/L)} \quad (2.1)$$

Les résultats seront exprimés en tonnes de CO_2 équivalents (CO_2 éq). Ils sont calculés à partir de la somme des produits des émissions émis des trois GES par le potentiel de réchauffement planétaire (tableau 2.1).

Tableau 2.1: Coefficients de potentiel de réchauffement planétaire (ministère du Développement durable et de la lutte contre les changements climatiques, 2018)

GES	Potentiel de réchauffement planétaire (Kg CO_2 -éq/kg)
CO_2	1
CH_4	25
N_2O	298

L'équation finale utilisée pour calculer les CO_2 équivalente est la suivante :

$$kgCO_2\acute{eq} = (kgCO_2 \times 1) + (kgCH_4 \times 25) + (kgN_2O \times 298) \quad (2.2)$$

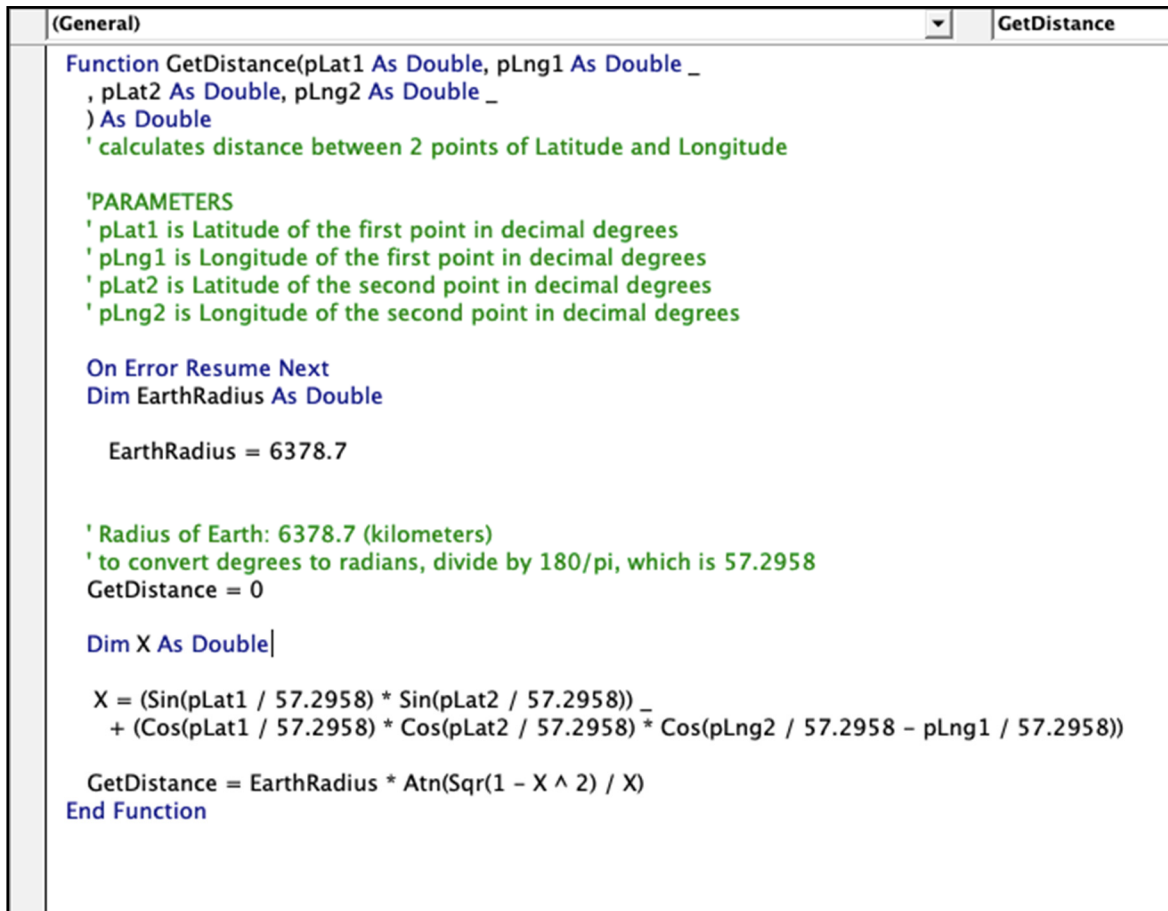
2.2.3.1 Activités routières

Grâce à l'approche conçue pour l'exploitation des données de l'application MTL Trajet, détaillée précédemment, une approximation des activités routières de l'ensemble des déplacements dans l'agglomération de Montréal peut être faite. Les points GPS de chaque voyage, précisément les latitudes et longitudes, qui se trouvent dans le fichier « points » vont nous permettre d'estimer les distances parcourues des utilisateurs ayant comme moyen de transport : Voiture/moto. Cependant, il nous manque le point GPS de début et de fin de chaque voyage pour des raisons de confidentialité puisque les développeurs évitent, par exemple, de donner des indications sur les lieux des domiciles ou de travail des utilisateurs. Le processus de calcul des distances se divisera alors en deux parties.

Le calcul de la distance du trajet sans le début et la fin

Dans cette étape, Nous utiliserons les coordonnées GPS pour calculer les distances à vol d'oiseau entre chaque point/portion du voyage. Tout d'abord, la combinaison des données des deux fichiers est nécessaire pour filtrer les coordonnées GPS des voyages faits par voiture/moto, en conséquence nous avons utilisé le champ « id_trip » commun entre les deux fichiers pour faire la correspondance entre les points GPS et le mode de transport utilisé, en se servant de plusieurs fonctions Excel de recherche et filtre. Ensuite, nous avons créé une fonction VBA sur Excel qui prend comme paramètres d'entrée les latitudes et les longitudes de deux points et qui nous produit en sortie la distance en kilomètres entre ces deux points GPS (Figure 2.8). Compte tenu de la nature elliptique de la Terre, nous avons utilisé les fonctions trigonométriques, ainsi que le rayon de la Terre. Comme il y a plusieurs points GPS sur le même trajet, calculer la distance à vol d'oiseau entre chaque point GPS et les additionner sur

le trajet permet de réduire l'erreur plutôt que de prendre la distance à vol d'oiseau entre le départ et l'arrivée.



```

(Function) GetDistance
Function GetDistance(pLat1 As Double, pLng1 As Double _
, pLat2 As Double, pLng2 As Double _
) As Double
' calculates distance between 2 points of Latitude and Longitude

'PARAMETERS
' pLat1 is Latitude of the first point in decimal degrees
' pLng1 is Longitude of the first point in decimal degrees
' pLat2 is Latitude of the second point in decimal degrees
' pLng2 is Longitude of the second point in decimal degrees

On Error Resume Next
Dim EarthRadius As Double

EarthRadius = 6378.7

' Radius of Earth: 6378.7 (kilometers)
' to convert degrees to radians, divide by 180/pi, which is 57.2958
GetDistance = 0

Dim X As Double

X = (Sin(pLat1 / 57.2958) * Sin(pLat2 / 57.2958)) _
+ (Cos(pLat1 / 57.2958) * Cos(pLat2 / 57.2958) * Cos(pLng2 / 57.2958 - pLng1 / 57.2958))

GetDistance = EarthRadius * Atn(Sqr(1 - X ^ 2) / X)
End Function

```

Figure 2.8 : Fonction « GetDistance » qui calcule la distance en kilomètre entre deux points GPS

La fonction « GetDistance » permet de calculer la distance qui sépare deux points GPS, ce qui nous donne les distances de chaque portion des voyages. Avec la fonction Excel « SUMIF », nous calculons ensuite la somme de ces distances suivant l'identifiant de chaque voyage.

L'estimation de la distance au début et à la fin du trajet

Tout d'abord, dans le fichier « Points », nous allons calculer la moyenne des vitesses d'un voyage en utilisant la fonction AVERAGEIF. Dans ce même fichier, nous utiliserons la fonction VLOOKUP pour aller chercher les modes de transport dans le fichier « Trajet ». La combinaison de ces deux opérations va nous permettre de déterminer la vitesse moyenne de chaque mode de transport. Le fichier « Trajet » contient l'horaire du début et de la fin de chaque voyage et le fichier « Points » contient l'horodatage des points GPS enregistrés. Ces derniers ne contiennent pas les points GPS du départ et de l'arrivée de chaque trajet. Par conséquent, l'horodatage dans le fichier « Points » commence plus tard que le début du trajet dans le fichier « Trajet » et finit plus tôt. Nous allons donc calculer l'écart en secondes entre les données horaires dans les deux fichiers et les multiplier par la vitesse moyenne du voyage correspondant. Enfin, nous trouverons les distances parcourues au départ et à la fin de chaque trajet.

Dans un deuxième temps, nous remarquons que les modes de transport « voiture » et « motocyclette » sont combinés dans les données de l'application. Puisque cette dernière ne donne pas le choix à l'utilisateur de choisir si le voyage est fait par un certain type de véhicule, nous considérerons que le choix « Voiture/Moto » inclura la combinaison des quatre modes de transport : véhicule léger, camion léger, véhicule lourd et motocyclettes. Notre choix est basé sur les données de la Société de l'Assurance Automobile du Québec (SAAQ) sur les véhicules en circulation (figure 2.9). Nous avons choisi ces quatre types de véhicules en nous basant sur la grande majorité de la flotte et sur les données disponibles des cotes de consommations de carburant et des facteurs d'émissions. Bien que les données de la SAAQ soient mises à jour pour l'année 2019, nous considérerons les données de la flotte de l'année 2017 puisque nous sommes en train de manipuler les résultats de l'échantillonnage de 2017 de MTL Trajet.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Nombre de véhicules en circulation selon le type d'utilisation, le type de véhicule et l'âge du véhicule, Québec et régions administratives						
2							
3	Âge du véhicule : Total (Âge du véhicule)						
4	Région administrative : Montréal						
5							
6	Type d'utilisation	2000	2001	2002	2003	2004	2005
7	Type de véhicule	n	n	n	n	n	n
8	Promenade						
9	Automobile et camion léger	628780	639911	648353	663274	669315	672209
10	..Automobile	519678	526146	531451	539362	540022	537248
11	..Camion léger	108828	113476	116595	123624	128997	134610
12	..Non précisé	274	289	307	288	296	351
13	Motocyclette	9440	9966	10460	10985	11770	12448
14	Cyclomoteur	1098	1239	1425	1715	1998	2308
15	Habitation motorisée	563	552	568	584	645	648
16							
17	Utilisation institutionnelle, professionnelle ou commerciale						
18	Automobile et camion léger	106463	104092	106094	110539	112264	114544
19	..Automobile	50696	48309	49209	51887	52068	51747
20	..Camion léger	55630	55650	56763	58573	60145	62751
21	..Non précisé	137	133	122	79	51	46
22	Motocyclette	194	223	242	270	287	325
23	Cyclomoteur	37	44	38	46	42	49
24	Habitation motorisée	69	51	49	49	49	98
25	Taxi	3568	3561	3541	3527	3488	3469
26	Autobus	2145	2267	2309	2279	2262	2291
27	Circulation restreinte						
28	Automobile et camion léger	208	216	212	201	207	240
29	..Automobile	176	183	177	165	172	196
30	..Camion léger	18	20	23	30	32	38

Figure 2.9 : Nombre de véhicules en circulation selon le type d'utilisation, le type de véhicule et l'âge du véhicule à Montréal (Société de l'assurance automobile du Québec (SAAQ) 2019)

Enfin, nous allons calculer les pourcentages de chaque type de véhicule par rapport à l'ensemble de toute la flotte enregistrée dans le registre d'immatriculation de la SAAQ. Ensuite, nous multiplierons ces pourcentages par le nombre de kilomètres parcourus par le choix « Voiture/Moto » pour avoir les activités routières (km) des quatre types de véhicules séparément. Nous utiliserons aussi le guide de la consommation de carburant de l'année 2017, créé par le gouvernement du Canada, pour calculer les pourcentages des véhicules à essence et à diesel de l'ensemble des quatre types de véhicules.

2.2.3.2 Consommation de carburant

Le gouvernement du Canada publie des guides annuels de consommation de carburant pour la plupart des véhicules en circulation. Ces données publiées en ligne sur un fichier Excel fournissent des renseignements fiables aux consommateurs sur le rendement du carburant de chaque modèle de véhicules. Les renseignements sont destinés essentiellement à comparer la consommation de carburant de divers modèles afin de choisir le véhicule le plus éco énergétique qui réponde aux besoins quotidiens (Gouvernement du Canada, 2019).

Dans notre étude, en se basant sur le fichier Excel fourni par le gouvernement, nous avons calculé la moyenne des cotes de consommation de carburant des véhicules légers pour la flotte enregistrée en 2017 (Figure 2.10). Parmi les limites de notre méthodologie, on cite que nous n'avons pas pris en considération les véhicules électriques sans émissions dans le parc des véhicules en sachant que le pourcentage de ce type de véhicule en 2017 était 0.1% de l'ensemble de la flotte (Association des véhicules électriques de Québec 2020).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	MODÈLE	MARQUE	MODÈLE	cat de VÉHICULE	CYLINDRÉ	CYLINDRÉ	TRANSMIS	CARBURANT	VILLE (L/100 km)
2	2017	ACURA	ILX	COMPACTE	2.4	4	AM8	Z	9.4
6	2017	ACURA	NSX	DEUX PLACES	3.5	6	AM9	Z	11.1
8	2017	ACURA	RLX HYBRID	INTERMÉDIAIRE	3.5	6	AM7	Z	8.2
9	2017	ACURA	TLX	COMPACTE	2.4	4	AM8	Z	9.6
10	2017	ACURA	TLX SH-AWD	COMPACTE	3.5	6	AS9	Z	11.2
11	2017	ALFA ROMEO	4C	DEUX PLACES	1.8	4	AM6	Z	9.7
12	2017	ALFA ROMEO	4C SPIDER	DEUX PLACES	1.8	4	AM6	Z	9.7
13	2017	ALFA ROMEO	GIULIA	INTERMÉDIAIRE	2.0	4	A8	Z	10.0
14	2017	ALFA ROMEO	GIULIA AWD	INTERMÉDIAIRE	2.0	4	A8	Z	10.5
15	2017	ALFA ROMEO	GIULIA QUADRIFOGLIO	INTERMÉDIAIRE	2.9	6	A8	Z	13.8
16	2017	ASTON MAR	DB11 V12	MINICOMPACTE	5.2	12	A8	Z	15.5
17	2017	ASTON MAR	RAPIDE S	SOUS-COMPACTE	6.0	12	A8	Z	16.7
18	2017	ASTON MAR	VANQUISH	MINICOMPACTE	6.0	12	A8	Z	17.5
19	2017	ASTON MAR	V12 VANTAGE S	DEUX PLACES	6.0	12	AM7	Z	19.4
20	2017	ASTON MAR	V12 VANTAGE S	DEUX PLACES	6.0	12	M7	Z	23.2
21	2017	AUDI	A3	SOUS-COMPACTE	2.0	4	AM7	X	9.1
22	2017	AUDI	A3 QUATTRO	SOUS-COMPACTE	2.0	4	AM6	X	9.7
23	2017	AUDI	A3 CABRIOLET QUATTRO	SOUS-COMPACTE	2.0	4	AM6	X	10.8
24	2017	AUDI	A4 ULTRA	COMPACTE	2.0	4	AM7	Z	8.6
25	2017	AUDI	A4 QUATTRO	COMPACTE	2.0	4	AM7	Z	9.8
26	2017	AUDI	A4 QUATTRO	COMPACTE	2.0	4	M6	Z	9.9
27	2017	AUDI	A4 ALLROAD QUATTRO	FAMILIALE - PETITE	2.0	4	AM7	Z	10.2
28	2017	AUDI	A5 QUATTRO	SOUS-COMPACTE	2.0	4	AS8	Z	11.0
29	2017	AUDI	A5 QUATTRO	SOUS-COMPACTE	2.0	4	M6	Z	10.4
30	2017	AUDI	A5 CABRIOLET QUATTRO	SOUS-COMPACTE	2.0	4	AS8	Z	11.3
31	2017	AUDI	A6 QUATTRO	INTERMÉDIAIRE	2.0	4	AS8	Z	10.9
32	2017	AUDI	A6 QUATTRO	INTERMÉDIAIRE	3.0	6	AS8	Z	11.5
33	2017	AUDI	A7 QUATTRO	INTERMÉDIAIRE	2.0	4	AS8	Z	11.5

Figure 2.10 : Les véhicules autorisés à circuler en 2017 selon leurs caractéristiques et les données sociodémographiques

Nous utiliserons cette moyenne, qui est 10,08 L/100 km, pour nos calculs d'émissions de GES. Malheureusement, dans ce fichier, on ne trouve que les caractéristiques des véhicules légers et quelques modèles de camions légers. Nous avons donc aussi utilisé le document Excel « EmissionFactorsfrom Cross-Sector Tools » publié comme outil du Protocole mondial pour les inventaires des gaz à effet de serre (GHG Protocol 2017), afin de calculer la moyenne des cotes de consommation des camions légers, des véhicules lourds et des motocyclettes. Les résultats obtenus ont été soutenus par des résultats publiés dans le rapport « le camionnage au Québec » (Ministère des Transports 2018) pour le cas des véhicules lourds. À travers ce fichier, le Protocole mondial considère que pour les deux types de carburants, les cotes de consommation sont approximativement les mêmes. L'ensemble des cotes de consommation de carburant pour les quatre types de véhicules sont alors présentées dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.2: Les côtes de consommations de carburant par type de véhicule

Type de véhicule	Cote de consommation
Véhicules légers	10,08 L/100 km
Camions légers	11,6 L/100 km
Véhicules lourds	30,9 L/100 km
Motocyclette	4,7 L/100 km

Les cotes de consommations sont basées sur plusieurs essais en laboratoire faits sur les différents types de véhicules comme : l’essai par temps froid, l’essai avec climatiseur, essai à haute vitesse, essai sur route pour simuler la conduite en ville, etc. Ce qui s’accorde parfaitement avec les recherches étudiées dans la section 1.2.1.3 de la revue de la littérature.

Nous devons ensuite calculer les pourcentages des véhicules à essence ou diesel pour chaque type de véhicules. Sachant que la plupart des camions lourds fonctionnent au diesel (Ministère des Transports 2018) et les motocyclettes, à l’essence (La Ville de Montréal 2019), il reste à calculer les pourcentages des véhicules légers à essence et au diesel et les pourcentages des camions légers à essence et au diesel. Pour parvenir à faire ces calculs, nous avons utilisé le fichier Excel « Guide de consommation de carburant 2017 » (figure 2.9) publié par le gouvernement du Canada et qui contient tous les types de véhicules légers et de camions légers avec leur type de carburant.

2.2.3.3 Facteurs d’émission

Nous avons tiré les facteurs d’émissions des gaz à effet de serre de l’inventaire des émissions de la collectivité montréalaise (Tableau 2.3 et Tableau 2.4). Les coefficients d’émissions de CO_2 est la même pour tous les véhicules routiers pour un même type de carburant, soit 2316 g/L d’essence et 2690 g/L de diesel (La Ville de Montréal 2019).

Tableau 2.3: Facteurs d'émissions des véhicules à essences (g/L)(La Ville de Montréal 2019)

	<i>CH₄</i>	<i>N₂O</i>
Véhicules légers à essence	0,17	0,16
Camions légers à essence	0,16	0,14
Motocyclette à essence	1,24	0,04

Tableau 2.4: Facteurs d'émissions des véhicules au diesel (g/L) (La Ville de Montréal 2019)

	<i>CH₄</i>	<i>N₂O</i>
Véhicules légers au diesel	0,05	0,22
Camions légers au diesel	0,07	0,22
Véhicules lourds au diesel	0,12	0,13

2.2.3.4 Modèle Bottom-Up d'estimation des émissions de GES du transport routier

En prenant en considération les nouveaux paramètres des cotes de consommation par type de véhicule et des facteurs d'émissions de GES par type de carburant, l'équation 2.1 va être modifiée pour s'adapter à ces données importantes. La nouvelle équation est la suivante :

$$\begin{aligned}
 GES_{emis_h}(g) = & \sum_{ij} \text{Activités routières (km)} * \% \text{ type du véhicule}_i * \\
 & \% \text{ véhicule par carburant}_{ij} * \% \text{ taux de consommation du type de véhicule}_i (L/km) * \\
 & \% \text{ facteur d'émissions du type de carburant}_{ijh} (g/L) \quad \forall h
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

Avec :

$i \in \{ \text{véhicule léger, camion léger, camion lourd, motocyclette} \}$

$j \in \{ \text{essence, diesel} \}$

$h \in \{ CO_2, CH_4, N_2O \}$

Cette équation nous donne la quantité émise des trois gaz à effet de serre par l'ensemble de la flotte. Ensuite, nous allons appliquer l'équation 2.2 sur les résultats trouvés précédemment. Nous multiplierons donc les quantités de chacun des GES trouvés en gramme par le potentiel de réchauffement climatique du gaz et enfin nous en ferons la somme pour aboutir à une quantité totale de CO_2 équivalent.

2.2.3.5 Méthodologie d'extrapolation

Le résultat que nous allons trouver, à l'aide de l'équation 2.3, va nous fournir la quantité de GES émis par l'ensemble des utilisateurs de l'application MTL Trajet qui ont utilisé le mode de transport voiture/moto. L'échantillonnage des données GPS permettant de calculer le kilométrage parcouru du transport routier et, par la suite, de calculer les émissions GES s'étend sur une semaine (du 18 septembre au 24 septembre 2017).

Notre objectif est de calculer les émissions de gaz à effet de serre du transport routier de l'ensemble de l'agglomération montréalaise pendant une année afin de les comparer avec les résultats des inventaires d'émissions de GES publiés par la Ville de Montréal. Il faut donc extrapoler la valeur obtenue en exploitant les données procurées par l'application. Nous passerons de la petite échelle de notre échantillon sur une semaine à une échelle plus grande, celle dans ce cas de la population de l'agglomération montréalaise et sur une année complète. Deux méthodes d'extrapolation sont proposées afin de les comparer et d'observer l'effet du choix de la méthode sur les valeurs résultantes.

- En premier lieu nous allons considérer le nombre total de gens qui ont validé au moins un déplacement avec l'application, c'est-à-dire 4425. En 2017, la population de l'agglomération montréalaise est de 1,942 million d'habitants (United Nations, 2017). Cette approche surestime nécessairement les émissions, car une bonne partie de la population n'utilise pas de véhicules moteur (comme les enfants et les gens très âgés). Elle constitue donc nécessairement la borne supérieure de l'intervalle. Sachant que l'année 2017 comptait 52 semaines, l'équation qui nous permettra de faire l'extrapolation linéaire selon ce cas de figure est la suivante :

$$GES \text{ émis } (kt \text{ CO}_2 \text{ éq}) = \frac{1\,942\,044}{4425} \times E (kt \text{ CO}_2 \text{ éq}) \times 52 \quad (2.4)$$

Avec E la quantité de GES émis par l'ensemble des utilisateurs du mode transport routier de l'application pendant la semaine d'échantillonnage.

- Le deuxième cas de figure sera de prendre en considération les gens qui ont utilisé le transport routier seulement suivant l'application, autrement dit nous utiliserons le pourcentage des utilisateurs de voiture/moto du nombre total de gens qui ont validé au moins un déplacement. En outre, en agrandissant l'échelle suivant cette approche, nous prendrons en compte le nombre de véhicules enregistrés sur l'agglomération de Montréal en 2017 qui est 968201 (Société de l'assurance automobile du Québec (SAAQ) 2019). Nous obtenons alors l'équation de l'extrapolation linéaire suivante :

$$GES \text{ émis } (kt \text{ CO}_2 \text{ éq}) = \frac{968\,201}{V} \times E (kt \text{ CO}_2 \text{ éq}) \times 52 \quad (2.5)$$

Avec :

$V = 1440$: Nombre d'utilisateurs qui ont fait des trajets en voiture/moto

CHAPITRE 3

RÉSULTATS ET INTERPRETATION

3.1 Lecture et interprétation des tendances

Parmi les analyses suivantes, celles portant sur les modes de transport et réalisées à l'aide des données du fichier « Trajets » s'étendent sur une période d'un mois, alors que celles portant sur la densité spatiale et reposant sur les positions GPS du fichier « Points » s'étendent sur une semaine seulement, s'ajustant ainsi à la disponibilité des données provenant de l'application.

3.1.1 Pourcentage des modes de transport par jour

La Figure 3.1 présente les pourcentages des différents modes ou combinaisons de modes de transport calculés en divisant le nombre de déplacements fait par un mode de transport donné par le nombre total de déplacements pour chaque jour du mois. Comme la légende de la Figure 3.1 le montre, le nombre de combinaisons de modes de transport est très grand. Afin d'améliorer la lisibilité et de garder uniquement les données nous permettant de tirer des conclusions, nous avons retiré toutes les combinaisons de modes de transport ayant des pourcentages inférieurs à 0,1 % (Figure 3.2). Cette analyse nous a permis de remarquer qu'il y a un grand nombre d'utilisateurs qui n'ont pas enregistré leurs modes de transport dans l'application. Cette situation affecte négativement la quantité d'informations utiles pour nos estimations d'émissions et pour l'étude des comportements des usagers. Les cinq modes de transport présentant les pourcentages les plus élevés sont présentés à la Figure 3.2, soit : à pied, à pied/Transport collectif, Transport collectif, Vélo et Voiture/Moto.

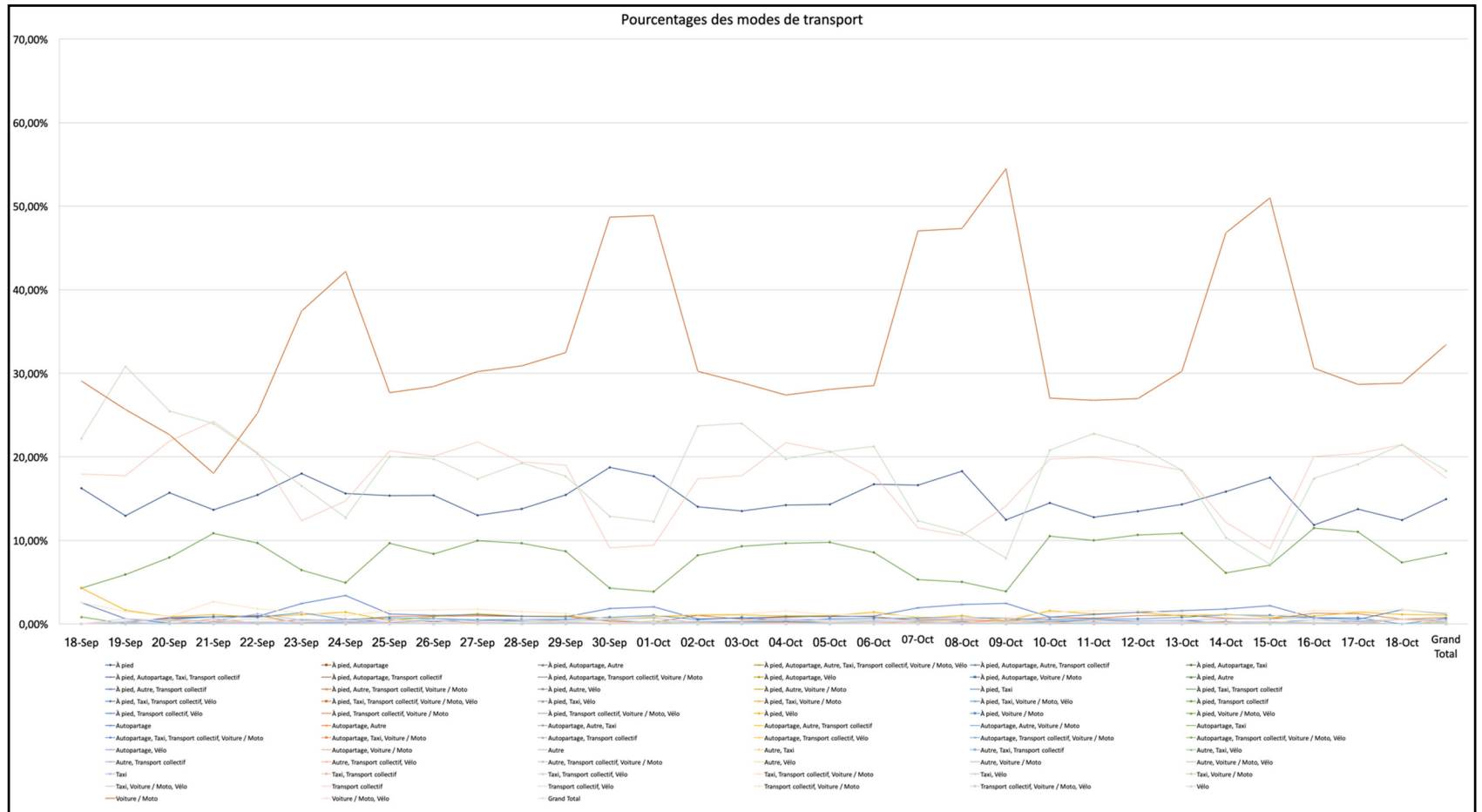


Figure 3.1 : Représentation du pourcentage de chaque mode ou combinaison de modes de transport par jour dans la période allant de 18 septembre au 18 octobre à l'agglomération montréalaise

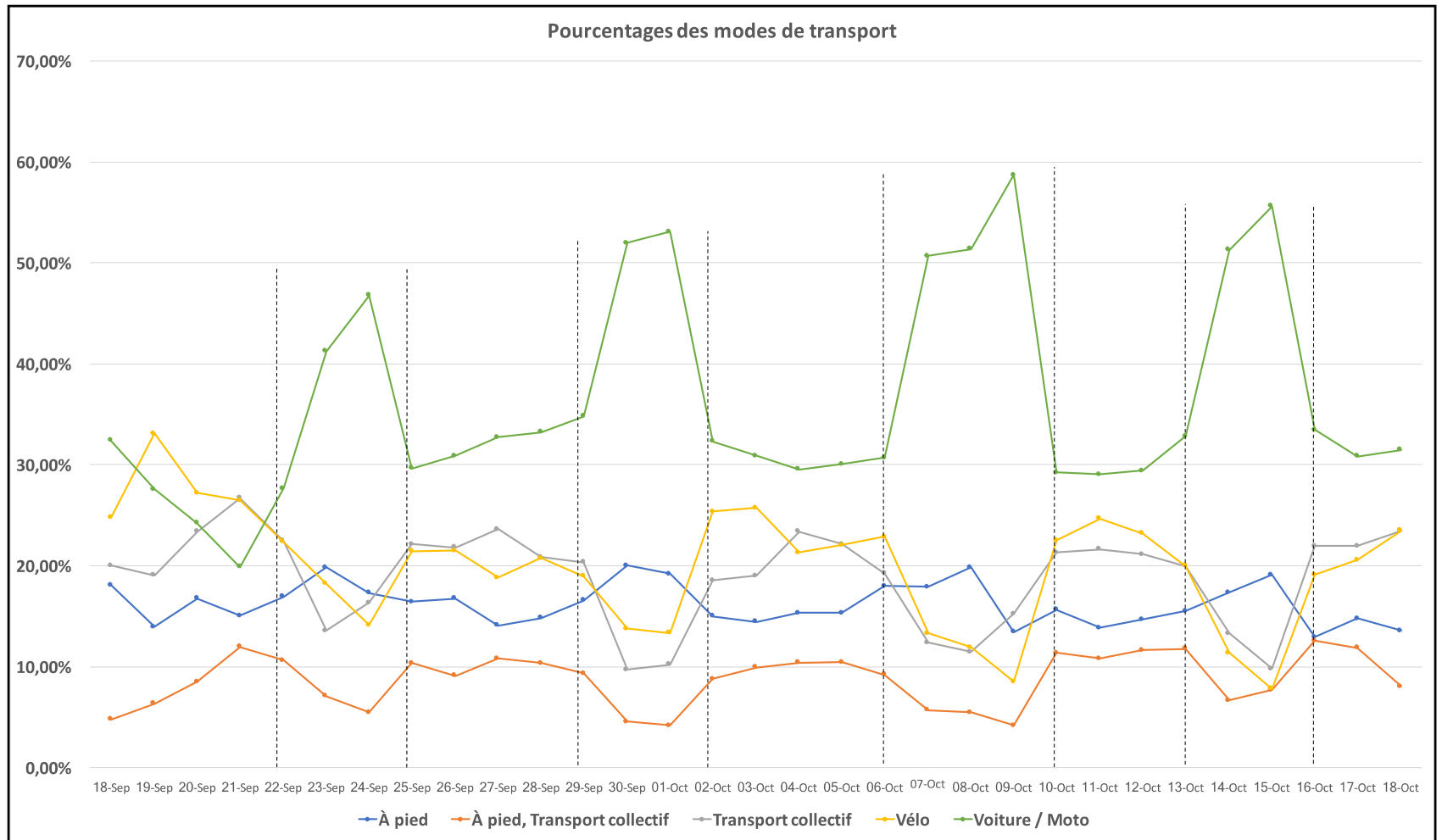


Figure 3.2: Pourcentage des cinq principaux modes de transport par jour

Nous observons une différence nette entre les jours de la semaine (lundi à vendredi) et ceux de fin de semaine (samedi et dimanche) qui sont délimités par les lignes pointillés en noir. En effet, l'utilisation des voitures/motos augmente considérablement les fins de semaine par rapport aux jours de semaine tandis que l'utilisation des transports collectifs et du vélo diminue. Les quatre fins de semaine enregistrées dans l'application sont toutes composées de deux journées (samedi et dimanche), sauf celle du 7 au 9 octobre qui dure trois jours, le lundi 9 octobre étant un jour férié (Action de grâce).

3.1.2 Modification des habitudes de transport en fonction de la température et des précipitations

La Figure 3.3 présente les données de la Figure 3.2 auxquelles nous avons ajouté les données de températures minimales et maximales observées pour chacune des journées (axe secondaire) afin d'analyser le comportement des gens et leur résilience face aux aléas climatiques.

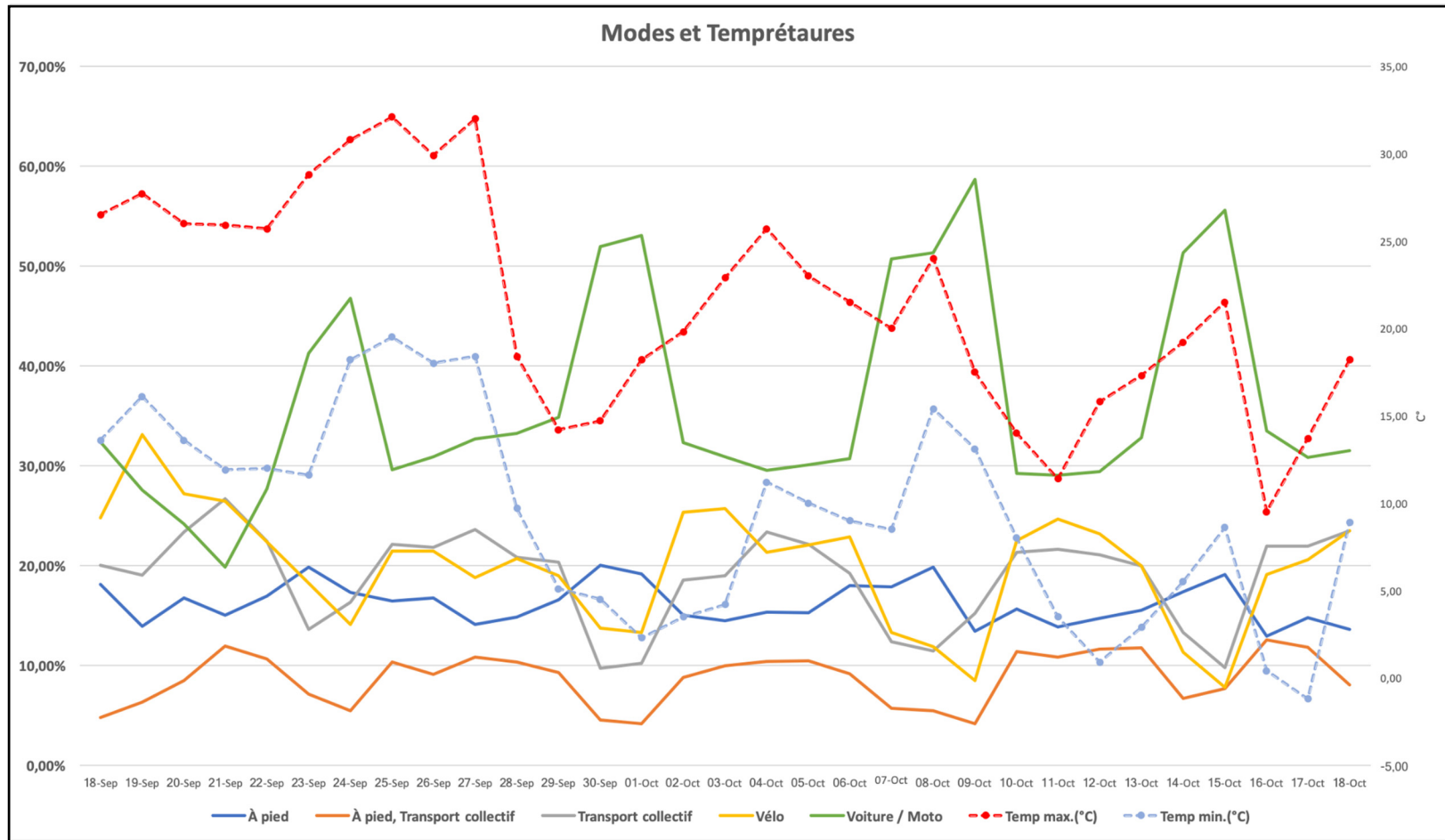


Figure 3.3: Pourcentages des cinq principaux modes de transport et évolution de la température

On remarque une légère augmentation dans le pourcentage d'utilisation des transports collectifs dans la journée du 27 septembre, qui atteignait 24 %, par rapport à la moyenne mensuelle des journées du cours de la semaine, 22 %. Cette journée est la journée la plus chaude enregistrée durant ce mois avec une température maximale de 32 °C. On enregistre aussi une diminution significative dans le pourcentage des piétons dans la journée du 16 octobre, qui atteignait 11,5 %, par rapport à la moyenne mensuelle de 13 %. Cette journée est la deuxième journée la plus froide du mois avec une température minimale de 0 °C.

La Figure 3.4 présente les pourcentages des principaux modes de transport en fonction du jour de la semaine (comme dans les Figures 3.2 et 3.3), auxquels nous avons ajouté sur l'axe secondaire les précipitations quotidiennes. Pour les journées pluvieuses du 9 et du 15 octobre, nous observons une diminution, plus forte que la moyenne, des modes de transport actifs (piétons/transport collectif et vélo), 9 % contre 12 % en moyenne pour les vélos et 5 % contre 7 % en moyenne pour les piétons/transport collectif. Cette diminution peut être aussi dû au fait que le 9 octobre est une journée d'action de grâce.

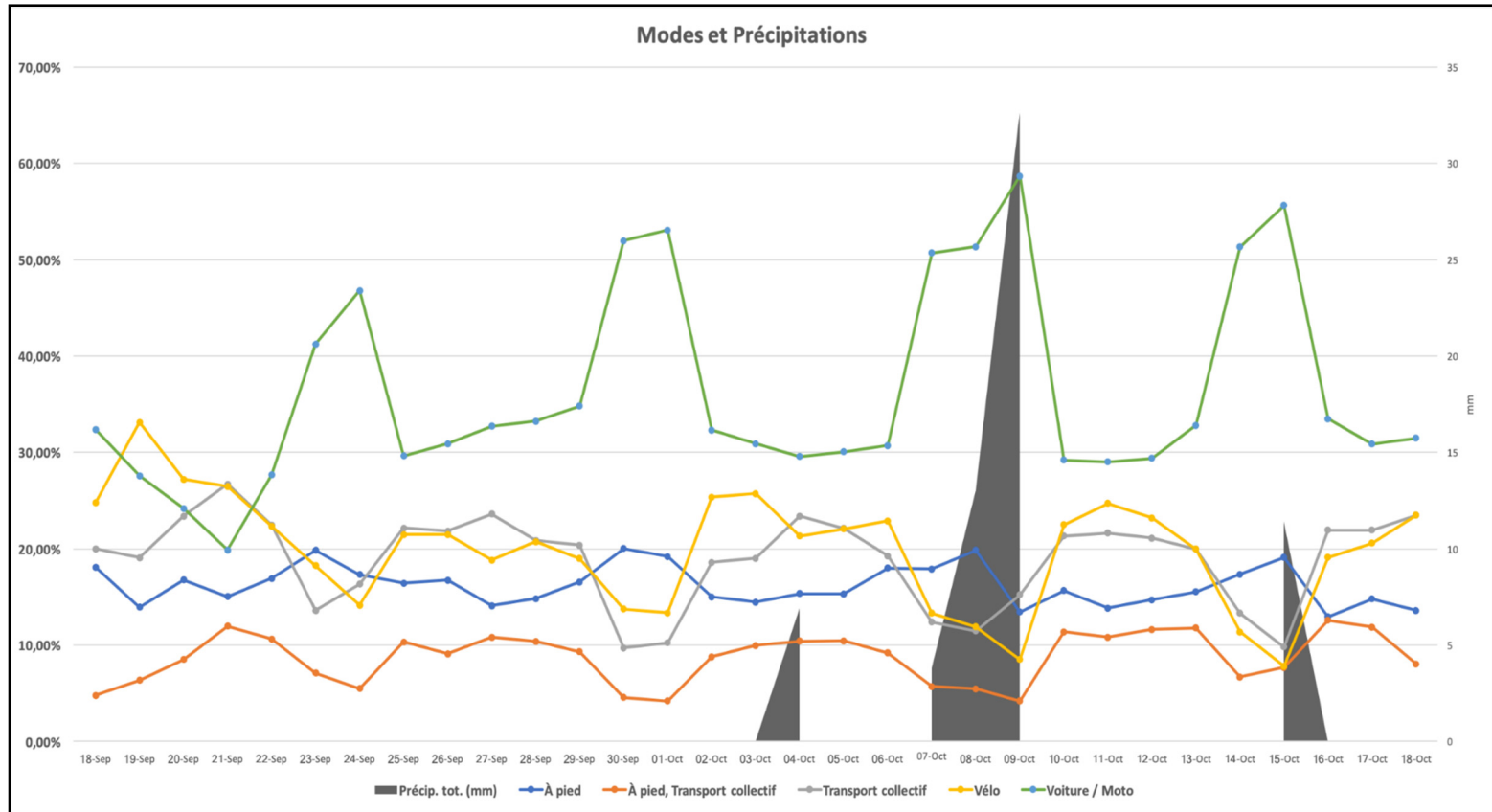


Figure 3.4 : Pourcentage des principaux modes de transport et précipitations quotidiennes

3.1.2.1 Journées de fin de semaine vs Journées de la semaine

La Figure 3.5 représente la densité des utilisateurs de l'application qui ont enregistré leurs modes de déplacement comme piétons pendant une journée du cours de la semaine (mercredi 20 septembre 2017). Il est clair que la densité est concentrée au centre-ville de Montréal et aussi, mais moins fortement, sur Le Plateau-Mont-Royal et dans Ahuntsic.

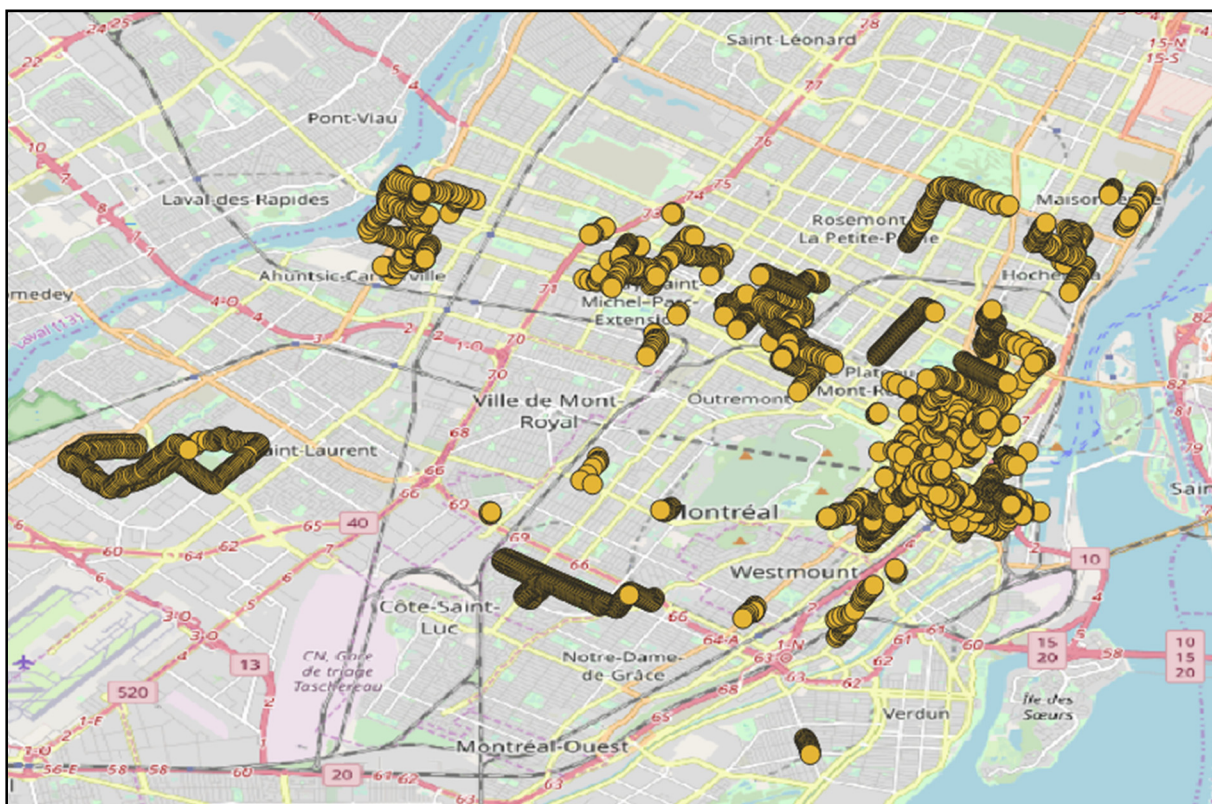


Figure 3.5 : Représentation sur QGIS de la densité piétonnière pour la journée du mercredi 20 septembre 2017

Ce type de représentation graphique peut nous aider à prédire les modes de transport utilisés par les personnes qui ne les ont pas enregistrés, en implémentant dans le logiciel les coordonnées GPS par déplacement. Par exemple, si les points GPS d'un déplacement suivent

parfaitement une ligne de métro ou d'autobus et que la vitesse correspond, nous pourrions déduire que le transport collectif est le mode employé pour ce déplacement.

La Figure 3.6 représente la densité des utilisateurs de l'application ayant enregistré leur mode de déplacement comme piétons pendant une journée de fin de semaine (samedi 23 septembre 2017). Il est clair que la densité est plus répartie sur le territoire et moins concentrée sur le centre-ville et sur l'arrondissement de Ville-Marie. On trouve une plus forte densité piétonnière sur les lieux de centres d'intérêt comme certains parcs (par exemple, le parc Jean-Drapeau).

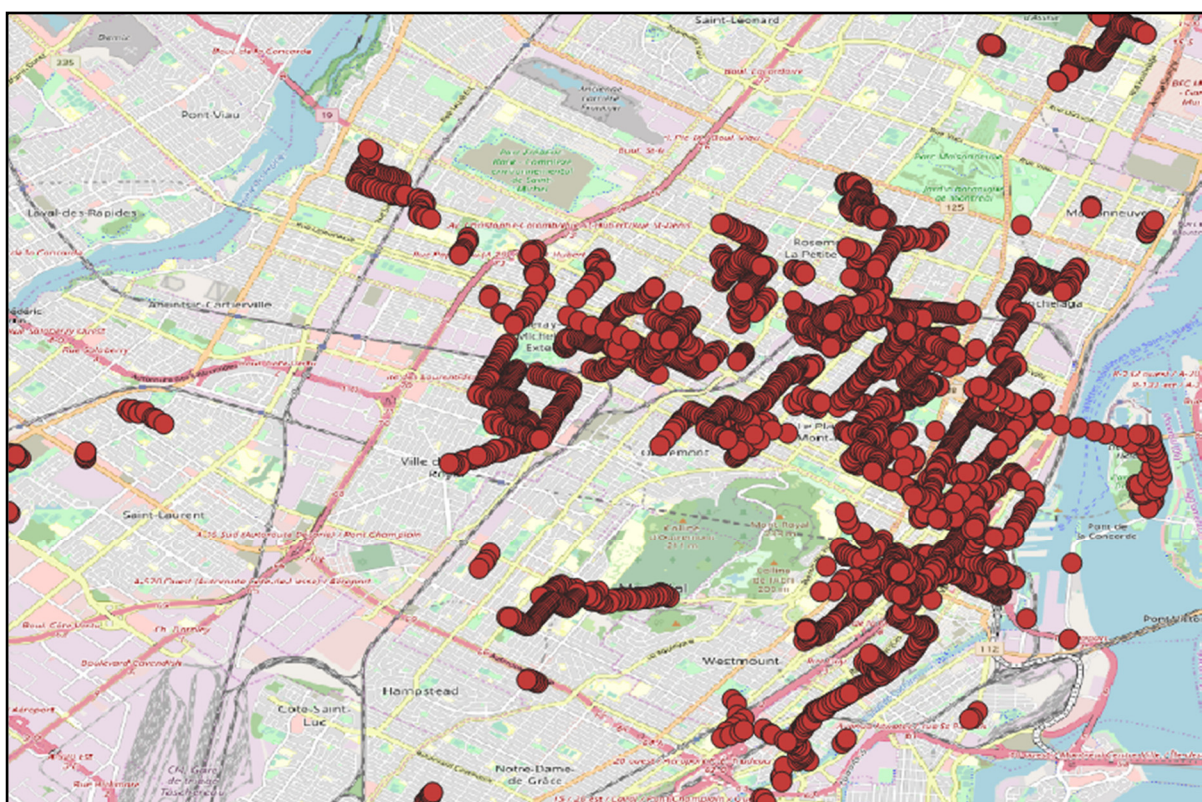


Figure 3.6 : Représentation sur QGIS de la densité piétonnière pour la journée du samedi 23 septembre 2017

3.1.2.2 Heures de pointe vs en-dehors des heures de pointe

- **Densité piétonnière**

Afin de représenter les densités piétonnières durant et en dehors des heures de pointe, deux plages horaires pour chaque catégorie ont été considérées. Les périodes d'heures de pointe s'étendent de 6 h à 9 h les matins et de 16 h à 19 h les après-midis. Les plages horaires hors heures de pointe sont de 9 h à 16 h et de 19 h à 6 h.

La Figure 3.7 présente les données GPS des piétons pendant les heures de pointe durant toute la semaine de collecte de données en excluant les fins de semaine. Malheureusement, le nombre d'utilisateurs piétons ayant indiqué leur mode de transport dans l'application est très limité.

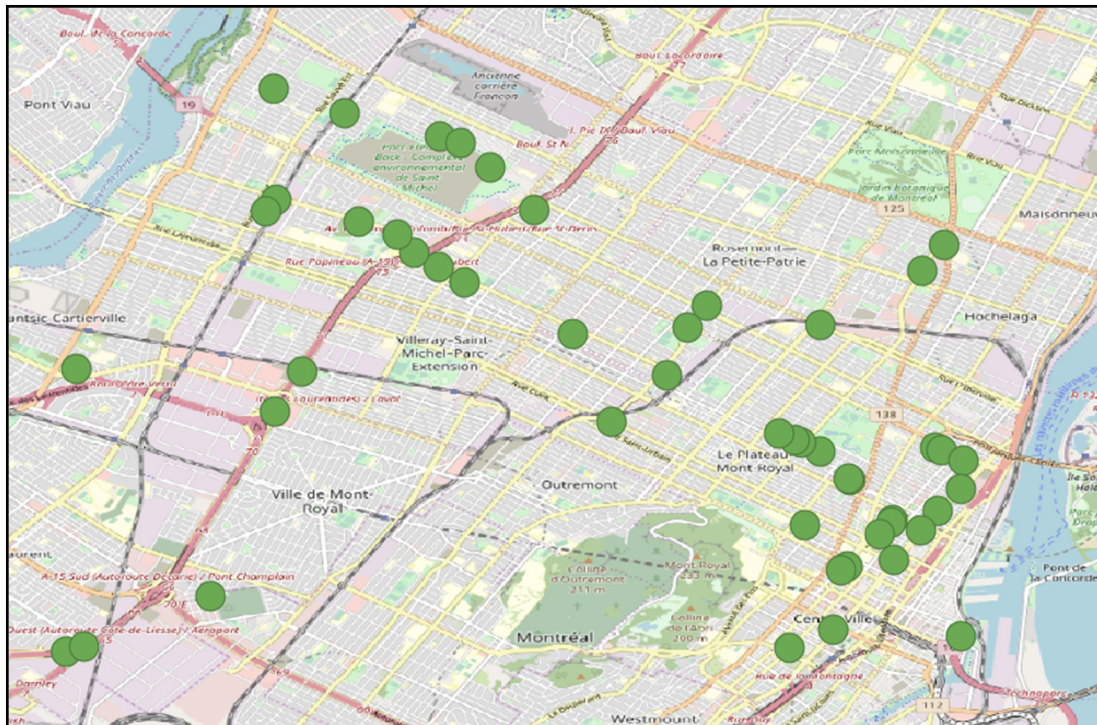


Figure 3.7 : Représentation sur QGIS de la densité des piétons du 18 au 22 septembre aux heures de pointe

La Figure 3.8 présente la densité piétonnière pour les deux plages horaires hors des heures de pointe. On remarque dans les deux cas que les données de densité et de nombre de localisations GPS (165 données de 19 h à 6 h et 242 données de 9 h à 16 h) sont beaucoup plus élevées que celles collectées pendant les heures de pointe (85 données GPS). Ces représentations sont valables pour toute la durée de la semaine de collecte de données. Il est difficile de tirer des conclusions de ces figures, car il manque trop de données.

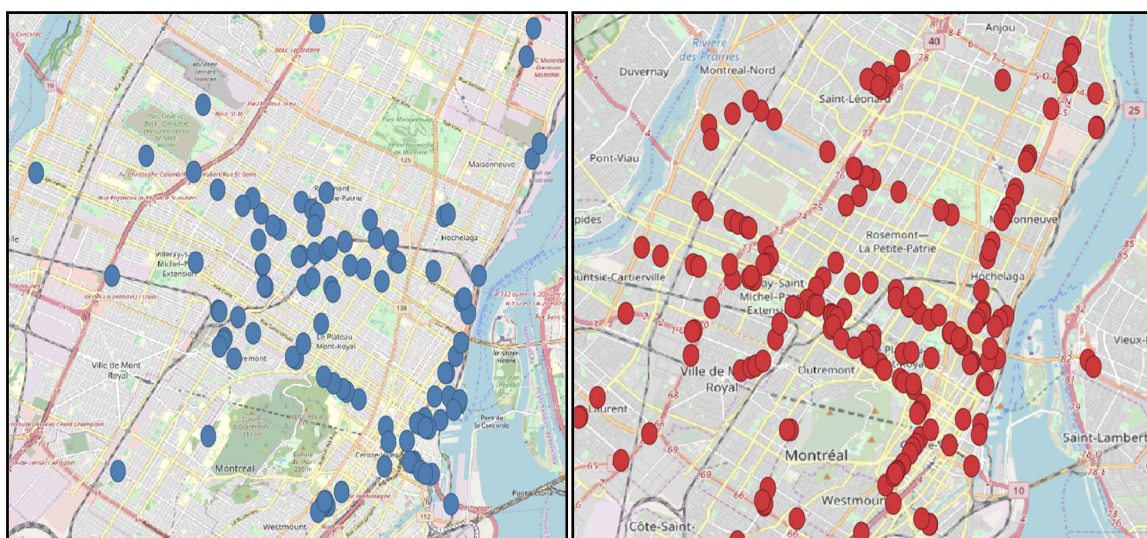


Figure 3.8: Représentation sur QGIS de la densité des piétons du 18 au 22 septembre hors des heures de pointe (à gauche, de 19 h à 6 h et à droite, de 9 h à 16 h)

- **Densité routière (voiture/moto, taxi, autopartage)**

La densité routière représentée à la Figure 3.9 nous permet de constater que les utilisateurs de véhicules aux heures de pointe sont dispersés dans toute la Ville de Montréal suivant les grands axes routiers. La densité ne semble pas aussi élevée au centre-ville. Plusieurs coordonnées GPS sont condensées sur les grands axes routiers présents sur le territoire.

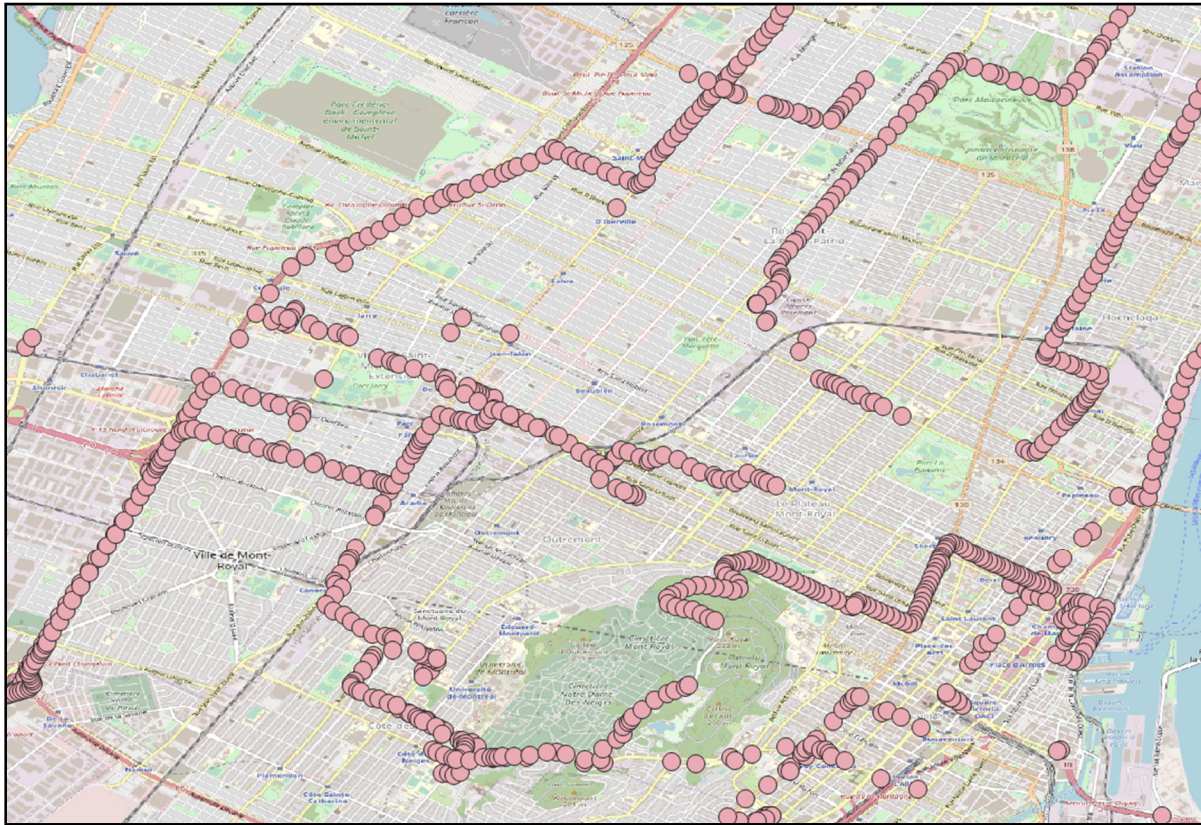


Figure 3.9 : Représentation sur QGIS de la densité routière le jeudi 21 septembre 2017 aux heures de pointe

La Figure 3.10 montre qu'en dehors des heures de pointe, la densité est plus importante dans les zones commerciales du centre-ville et ceci, surtout pendant la journée (à gauche). En effet, 4668 données GPS furent enregistrées par les utilisateurs contre seulement 2151 durant les heures de pointe. Il semble donc que les utilisateurs de MTL Trajet aient tendance à ouvrir et enregistrer leurs données plus en dehors des heures de pointe que durant celles-ci. Cette observation confirme notre remarque précédente concernant le manque de données fiables.

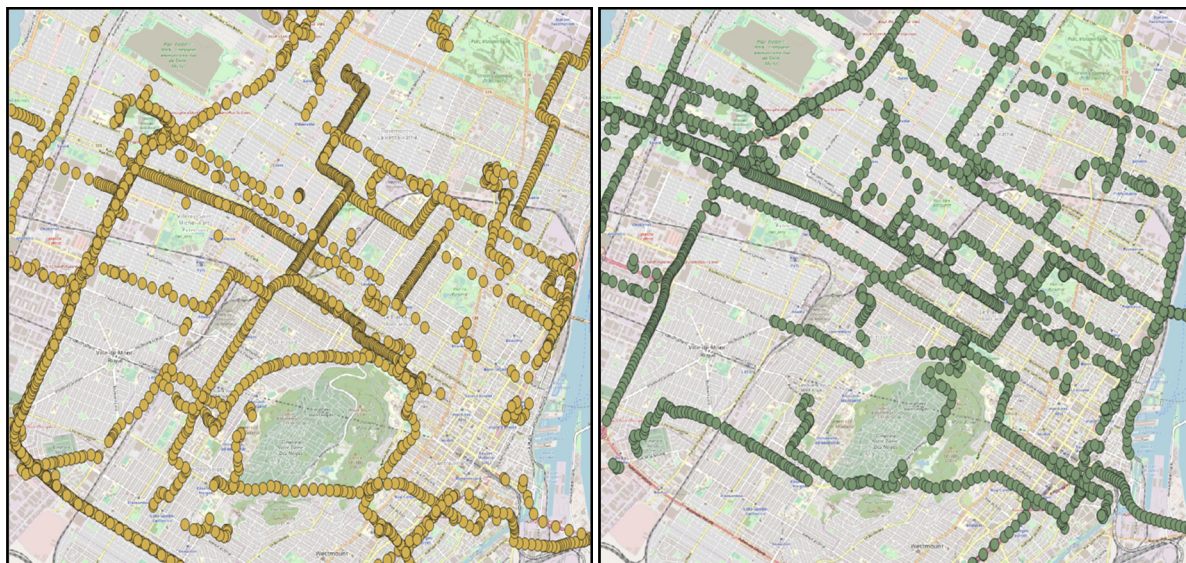


Figure 3.10 : Représentation sur QGIS de la densité routière le jeudi 21 septembre 2017 hors des heures de pointe (à gauche, de 9 h à 16 h et à droite, de 19 h à 6 h)

3.2 Les données GPS de MTL Trajet

Dans les sections précédentes, et afin d'étudier l'impact des conditions météorologiques sur les habitudes de déplacement des gens, nous avons travaillé avec le fichier « trajet ». Comparé au fichier « point », le fichier « trajet » contient 12 fois plus de voyages enregistrés (185 285 voyages enregistrés) que le fichier « point » (14 645 voyages enregistrés), ce qui est prévisible puisque la période d'échantillonnage du fichier « trajet » est d'un mois tandis que celle des données du fichier « point » est d'une semaine. Le pourcentage des voyages sur les réseaux routiers (par voiture/moto) correspond, à peu près, à 30 % du nombre total de voyages (Tableau 3.1).

Tableau 3.1: Classification des voyages dans le fichier « point » suivant le mode

Nombres de id_trip	Column Labels ☒							
Row Labels	18-Sep	19-Sep	20-Sep	21-Sep	22-Sep	23-Sep	24-Sep	Grand Total
À pied	18	101	137	111	147	156	102	772
À pied, Transport collectif	5	46	75	87	96	56	37	402
Transport collectif	21	138	201	200	198	105	93	956
Vélo	26	248	225	197	197	147	81	1121
Voiture / Moto	35	205	209	144	244	340	263	1440
Grand Total	105	738	847	739	882	804	576	4691

Le fichier « point » contient les coordonnées GPS des participants, utiles pour le calcul des activités routières, mais qui s'étendent, comme toutes les données présentes sur « point », sur une semaine seulement, du 18 au 24 septembre. Malheureusement, la majorité des données de latitude et longitude ne sont pas classées suivant un mode de transport (Tableau 3.2). La version de l'application en 2017 permettait aux utilisateurs de l'application de confirmer leurs voyages sans indiquer les moyens de transport utilisés. Heureusement, la quantité de données disponibles (44599 points GPS des 1440 voyages faits par voiture/moto) suffit pour accomplir notre étude. Les champs « 0 » et « (blank) » correspondent à des modes de transports indéterminés par l'utilisateur mais les données et les informations sur ces statistiques ne nous donnent pas la différence entre ces deux champs.

Tableau 3.2 : Les nombres et les pourcentages de points GPS par mode de transport

Row Labels	GPS Count	GPS Percentage
0	261124	25,19
À pied	6178	0,60
À pied, Transport collectif	7189	0,69
Transport collectif	16363	1,58
Vélo	35456	3,42
Voiture / Moto	44599	4,30
(blank)	665644	64,22
Grand Total	1036553	100,00

Afin de quantifier les émissions de GES dans le secteur routier, nous nous intéressons principalement aux 44 599 points GPS classés selon le mode de transport « voiture/moto », mais, en vue d'élargir notre échantillon, nous avons essayé de déterminer les modes de transport pour les utilisateurs de l'application qui n'ont pas précisé cette information. Les données GPS de leurs déplacements ont été entrées dans QGIS suivant la méthode utilisée dans 3.1.3, puis observées. Cette étape nous a permis de constater que des erreurs pouvaient s'y glisser, rendant alors la prédiction du mode de transport très difficile. Par exemple, la Figure 3.11 montre un déplacement qui suit une trajectoire quelconque et qui ne correspond à aucun mode de transport connu ou traditionnel.

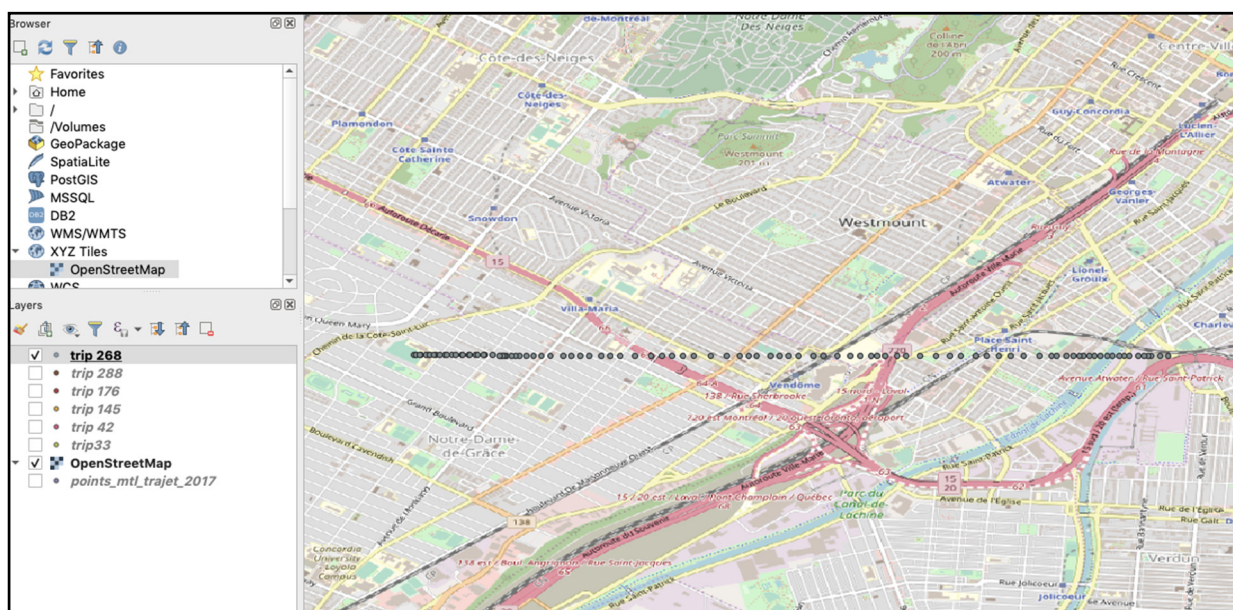


Figure 3.11 : Représentation d'un déplacement étrange sur QGIS

Ces cas sont impossibles à résoudre, mais cela ne concerne pas la majorité des déplacements. La procédure manuelle est très compliquée, car il faudrait prendre en considération beaucoup de paramètres, d'où la nécessité d'utiliser des outils d'intelligence artificielle.

3.3 Calcul des émissions de GES du transport urbain

3.3.1 Activités routières

3.3.1.1 Kilomètres parcourus

Comme nous l'expliquons dans la partie 2.2.5.1, le calcul des distances parcourues par l'ensemble des utilisateurs de l'application ayant utilisé comme moyen de transport « voiture/moto » se divise en deux parties.

La première partie est celle du calcul du trajet total de chaque voyage sans prendre en considération le début et de la fin de chaque trajet. On aboutit alors à une colonne qui contient les kilomètres parcourus de chacun des 1440 voyages en « voiture/moto » effectués par les utilisateurs (figure 3.3).

La deuxième partie comprend le calcul du début et de la fin des trajets. Nous avons créé deux colonnes qui contiendront respectivement la différence entre l'horaire du premier point GPS (dans le fichier « Point ») et le début du voyage en question (dans le fichier « Trajet »), et la différence entre la fin du voyage et l'horaire du dernier point GPS. Chacun des champs de ces deux colonnes correspond à un voyage en « voiture/moto » parmi les 1440 (figure 3.3)

La dernière étape de notre calcul consiste à faire la somme des trois colonnes créées dans la première et la deuxième partie du processus de calcul pour avoir en finalité la colonne qui contient les distances parcourues complètes de chaque voyage. Il suffit alors de faire la somme des champs de cette dernière colonne pour trouver le nombre de kilomètres parcourus par les utilisateurs sur le réseau routier de la ville de Montréal dans une période d'une semaine. Cette distance est 22 168,503 03 km (Tableau 3.3).

Tableau 3.3 : Calcul de l'activité routière avec les données de MTL Trajet

Full trip distance with GPS (km)	Distance added at start and finish (km)	Distance Total de chaque trip (km)	Total par "voiture/moto" (km)
44,80	6,55	51,34	22168,5
2,42	0,46	2,88	
29,11	9,12	38,24	
1,96	0,00	1,96	
6,20	0,64	6,85	
0,57	0,05	0,62	
24,42	20,21	44,63	
9,32	1,61	10,93	
3,20	0,00	3,20	
1,25	0,03	1,28	
12,54	1,73	14,27	
2,02	0,83	2,85	
21,07	0,73	21,81	
16,68	0,32	17,00	
1,32	0,39	1,71	
1,18	3,28	4,46	
5,52	0,80	6,32	
22,20	3,04	25,24	
0,70	0,08	0,78	
16,50	2,38	18,88	
10,62	0,06	10,67	

3.3.1.2 Types de véhicule et de carburant

En nous basant sur le fichier Excel fourni par la Société de l'assurance automobile du Québec (SAAQ), qui contient le nombre de véhicules en circulation selon le type en 2017 dans la région administrative de Montréal, nous avons calculé le pourcentage de chacun des types de véhicules définis dans la section 2.2.5.1 par rapport à l'ensemble de toute la flotte de véhicules et nous avons obtenu les résultats dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4: Pourcentage des différents types de véhicules par rapport à l'ensemble de la flotte

	2017			
	Véhicule léger	Camion léger	Camion lourd	Motocyclette
Nombres	545315	338751	49714	22994
Pourcentages	56%	35%	5%	2%

Puisqu'on considère que les véhicules en question consomment de l'essence et du diesel comme type de carburant pour fonctionner, les facteurs d'émissions dans la partie 2.2.5.3 sont divisés suivant ces deux types de carburant. En nous basant sur les données du fichier Guide

de consommation de Carburant 2017 » publié par le gouvernement du Canada et qui contient les types de véhicules légers et camions légers avec leur type de carburant et en choisissant comme filtre la région de l'agglomération de Montréal, nous sommes parvenus aux résultats présentés dans le tableau 3.5.

Tableau 3.5 : Pourcentage des véhicules et camions légers par type de carburant

	Véhicules légers	Camions légers
Essence	631	361
Diesel	6	9
Total	648	408
Pourcentage Essence	97%	88%
Pourcentage Diesel	1%	2%

3.3.2 Estimation des émissions de GES du transport routier

En utilisant l'équation 2.2 :

$$GES_{emis_h}(g) = \sum_{ij} \text{Activités routières (km)} * \% \text{ type du véhicule}_i * \\ \% \text{ véhicule par carburant}_{ij} * \% \text{ taux de consommation du type de véhicule}_i (L/km) * \\ \% \text{ facteur d'émissions du type par carburant}_{ijh} (g/L) \quad \forall h$$

avec l'ensemble des données trouvées dans les sections précédentes, on obtient la quantité émise des trois gaz à effet de serre par l'ensemble de la flotte. Par exemple, le calcul de CO_2 se fait comme suit :

$$CO_2(g) = 22\,168,5 * (0,56 * ((0,97 * 2316) + (0,01 * 2690))) + 0,35 * ((0,88 * 2316) + (0,02 * 2690)) + (0,05 * 2690) + (0,02 * 2316))$$

Pendant la semaine du 18 au 24 septembre, les quantités des gaz à effet de serre émis sont présentées dans le tableau 3.6.

Tableau 3.6 : Quantités de GES émis pendant la semaine du 18 au 24 septembre

Émissions de CO_2 (t)	Émissions de CH_4 (t)	Émissions de N_2O (t)
485,7	0,0385	0,0311

Ensuite, en appliquant l'équation 2.2 sur les résultats trouvés précédemment, on aboutit à une quantité de $t CO_2 \text{ éq}$ émis qui vaut 495,8 $t CO_2 \text{ éq}$.

3.3.3 Extrapolation et comparaison

La valeur trouvée à la section précédente représente la quantité de GES émis par l'ensemble des utilisateurs de l'application pendant une semaine. Il faut extrapoler cette valeur pour qu'elle soit représentative de la population montréalaise sur une année. On remplace alors la valeur trouvée dans la section précédente dans les équations 2.4 et 2.5 et on trouve respectivement :

$$GES \text{ émis} = \frac{1\,942\,044 \times 0.496 \times 52}{4425} = 11\,315 \text{ kt } CO_2 \text{ éq}$$

$$GES \text{ émis} = \frac{968\,201 \times 0.496 \times 52}{1440} = 17\,342 \text{ kt } CO_2 \text{ éq}$$

Le dernier inventaire de la collectivité montréalaise en 2015 nous indique que les émissions de GES du transport routier provenant de l'agglomération de Montréal en utilisant la méthodologie des ventes de carburant étaient 3 477 $kt CO_2 \text{ éq}$ (La Ville de Montréal 2019). Cela représente un grand écart par rapport à nos résultats trouvés en exploitant la méthodologie Ascendante et l'application MTL Trajet, qui sont 11 315 $kt CO_2 \text{ éq}$ et 17 342 $kt CO_2 \text{ éq}$. Étant donné les différentes incertitudes liées à la méthodologie de ventes de carburant et aux approximations faites dans l'approche Ascendante utilisée dans la présente étude, la différence entre les résultats ne peut ni confirmer ni infirmer la justesse de l'une des deux approches.

Dans le chapitre « Discussion », nous expliquerons en détail les points faibles et les incertitudes liés non seulement aux deux approches Ascendante et Descendante, mais aussi à la méthodologie d'extrapolation.

CHAPITRE 4

DISCUSSION

L'objectif principal de cette recherche était d'améliorer le processus d'estimation des émissions de GES du transport routier en milieu urbain. Nous visions à évaluer les méthodologies disponibles et à identifier les améliorations possibles, tout en tenant compte des caractéristiques de l'activité routière et des conditions météorologiques. Ce chapitre fournit les principaux commentaires suite aux résultats de cette étude, ainsi que les limites et les recommandations pour l'avenir de la recherche.

Comme mentionné dans la revue de la littérature, les deux approches Descendante et Ascendante présentent différentes limites. Grâce à l'élaboration de notre étude, nous allons pouvoir discuter de ces limites en relation avec les résultats trouvés et en comparant les deux approches avec chacun des différents points que nous présenterons.

Nous observons tout d'abord que l'écart entre les quantités de GES émis tel que présenté dans le rapport d'inventaire de la collectivité montréalaise et les résultats trouvés avec l'approche Ascendante en utilisant les données de MTL Trajet est très important. Différents facteurs expliquent cet écart :

- L'approche Descendante adoptée par de la Ville de Montréal utilise la méthodologie de ventes de carburant qui pourrait sous-estimer les émissions de gaz à effet de serre du transport routier ayant lieu sur le territoire. En fait, l'essence et le diesel vendus sur le territoire ne sont pas nécessairement les seuls à être brûlés à l'intérieur de l'agglomération de Montréal puisque les conducteurs peuvent acheter le carburant hors du réseau et par la suite circuler dans la ville. L'hypothèse basée sur le fait que seule la quantité de carburant vendu sur l'agglomération de Montréal sera utilisée dans le transport routier crée une incertitude. De nombreux résidents de la banlieue venant à

Montréal sont ainsi exclus de l'inventaire. Or, il s'agit là d'un point très important. Si nous mettions en place des mesures d'atténuation visant favoriser le transport collectif des gens provenant des banlieues, nous pourrions atténuer l'effet de sous-estimation sur les résultats avec la méthode de ventes de carburants.

- Dans notre approche Ascendante, nous avons développé une fonction VBA pour calculer les distances à vol d'oiseau entre les coordonnées GPS. Cette méthodologie de calcul n'est pas en mesure de représenter les distances réelles parcourues par les véhicules, surtout lorsque les trajets se composent de nombreux virages. C'est pour cette raison que la méthodologie peut être améliorée dans des recherches futures en développant des algorithmes automatisés travaillant avec les données de déplacement implémentées sur des logiciels GIS par exemple.
- La méthodologie d'extrapolation est une méthodologie qui se base sur l'estimation. Il existe différents types d'extrapolation comme l'extrapolation polynomiale et conique. Dans notre projet, puisque nous n'avons pas trouvé de précédente recherche sur l'estimation des émissions de gaz à effet de serre en utilisant l'approche Ascendante combinée avec les données géographiques de déplacement, nous avons utilisé une extrapolation linéaire, en nous basant sur une règle de trois. Cette méthodologie d'extrapolation donne généralement de bons résultats lorsque le point à estimer n'est pas très éloigné de notre plage de données disponibles. Dans notre situation, malheureusement, ceci n'était pas le cas, puisque nous ne voulions pas extrapoler un échantillon qui s'étend sur une semaine seulement et qui présente une portion des données de MTL Trajet vers une valeur annuelle générée par la population de l'agglomération montréalaise (différence de grandeur de plus de 10^3). De plus, l'incertitude s'ajoute considérablement à cette méthodologie du fait que l'échantillon fourni par l'application n'est ni pondéré ni représentatif de la population et suivant les statistiques de (la Ville de Montréal 2018), la distribution des âges des utilisateurs de

MTL Trajet est la suivante : 15% des utilisateurs ont entre 16 et 24 ans, 33% ont entre 25 et 34 ans, 27% entre 35 et 44 ans et 23% ont plus de 45 ans.

L'objectif des méthodes de pondération est d'être en mesure d'extrapoler les résultats d'un certain échantillonnage vers la population en corrigeant la représentativité, mais d'après les informations fournies par la Ville de Montréal sur les données de l'application, il s'est avéré que cette étape primordiale dans chaque sondage ou échantillonnage est manquante.

- Notre but est d'estimer une valeur annuelle à partir d'un échantillon qui s'étend sur une semaine. La semaine du 18 au 25 septembre 2017 n'est pas en mesure de représenter réellement les comportements des utilisateurs envers le transport pendant toute l'année, surtout si l'on tient compte de la variabilité des conditions climatiques ou de celle des facteurs démographiques comme les vacances. De ce fait, l'extrapolation du kilométrage parcouru pendant cette semaine vers l'année entière est hautement incertaine.
- Nous notons qu'il existe un grand écart entre les deux valeurs enregistrées en prenant en considération, respectivement, la population de l'agglomération de Montréal et les véhicules dont les propriétaires vivent sur le territoire. Dans la première, il est possible de surestimer les émissions puisqu'on inclut les gens qui ne peuvent pas utiliser l'application MTL Trajet, par exemple les enfants. Dans la deuxième, on réduit de 70% l'échantillon de MTL Trajet pour prendre en considération seulement les voyages faits par le mode voiture/moto, ce qui rend le dénominateur de la division assez petit. Cet échantillon, qui est déjà limité en termes d'étendue temporelle, justifie encore plus l'incertitude de la méthodologie d'extrapolation.

L'ensemble de ces estimations et de ces incertitudes dans les deux approches Ascendante et Descendante crée l'écart majeur trouvé entre les valeurs de quantités de GES émis par le transport routier. On obtenait alors une faible valeur d'émissions de GES, calculée avec la

méthodologie de ventes de carburant, par rapport aux valeurs calculées avec la méthodologie Ascendante du kilométrage parcouru. Les incertitudes de cette dernière proviennent principalement de la méthodologie d'extrapolation, qui pourrait être l'objet de recherches futures. Mais auparavant, des améliorations doivent être faites sur la source de données de notre méthodologie « Bottom-Up », c'est-à-dire l'application MTL Trajet. De ce fait, on se concentrera ensuite sur les limites et les recommandations de cet outil.

Dans ce projet, nous avons exploré la possibilité d'utiliser les données de l'application mobile MTL Trajet afin d'améliorer la précision et la résolution temporelle et spatiale des estimations d'émissions de GES du transport routier et de comprendre comment les aléas climatiques influençaient les habitudes de transport des utilisateurs. Les données utilisées, les plus récentes disponibles, sont celles de 2017. Quelques limites ont été identifiées dans le cadre de ce projet :

- La période d'échantillonnage, qui s'est étendue du 18 septembre au 18 octobre, se caractérise malheureusement par peu de variations climatiques (températures et précipitations), ce qui a limité la quantité et la qualité de nos analyses par rapport à la résilience des citoyens face aux aléas climatiques et à l'impact des conditions météorologiques sur leurs habitudes de transport. Nous aurions aimé faire des corrélations avec des approches statistiques, mais l'échantillon était trop petit pour que cela soit significatif (2-3 jours de précipitation, aucun extrême de température à part une journée à 30, etc...). Ceci affecte aussi la justesse du calcul d'émissions de GES puisque le climat pendant le mois de l'échantillonnage n'a pas le même effet sur l'habitude des utilisateurs envers le transport routier que durant les autres mois de l'année, surtout l'hiver à Montréal. L'extrapolation des résultats d'émissions de GES du mois d'échantillonnage de MTL Trajet présente une grande incertitude.
- L'échantillon n'est pas représentatif de la population et aucune pondération n'a été appliquée.

- Plus de la moitié des utilisateurs de l'application n'ont pas indiqué leurs modes de transport. Des efforts ont été faits dans la version 2019 en exigeant des utilisateurs qu'ils indiquent leurs modes de transport pendant au moins sept jours consécutifs afin d'être éligible à un concours. Lorsque les données seront disponibles, nous pourrions savoir si ces efforts ont porté leurs fruits.
- Le processus permettant à l'utilisateur d'indiquer ses modes de transport est très long et un peu fastidieux. Ceci peut influencer la certitude et l'intégrité des informations entrées. Le choix des modes de transport est très grand, car la plupart sont des combinaisons (plus de 60 modes de transport inclus).

Suite à l'analyse des limites, nous avons élaboré quelques recommandations afin d'augmenter le potentiel d'utilisation des données de l'application MTL Trajet dans l'avenir :

- Ajouter à l'application la fonctionnalité d'exécution en arrière-plan des appareils mobile, avec le consentement des utilisateurs. Avec l'accord de l'utilisateur pour une mise en route de l'application en arrière-plan dès sa première installation, on élimine le risque que des personnes installent l'application en premier lieu, mais oublient de la lancer tous les jours, surtout aux heures de pointe, durant lesquelles les utilisateurs ont plus tendance à ignorer l'application MTL Trajet et à ne pas indiquer leurs modes de transport.
- Appliquer une méthode de pondération et de traitement de données brutes afin de pouvoir extrapoler les activités observées à l'ensemble de la collectivité. La méthode de pondération linéaire employé dans notre méthodologie a eu un impact gigantesque sur le résultat d'où la nécessité de ce développement dédié à la pondération.
- Revoir la méthode de renseignement des moyens de transport par l'utilisateur dans l'application. Par exemple, proposer des suggestions de modes de transport aux

utilisateurs. Ces suggestions pourraient être basées sur la vitesse avec laquelle ils se déplacent, sur le trajet emprunté (en intégrant les lignes métro, d'autobus et de train ainsi que les différents arrêts), l'heure (en intégrant les horaires du transport en commun), les emplacements des Bixi, etc. Ces améliorations algorithmiques sont très recommandées et pourraient faire l'objet de projets de recherche.

- Proposer des modes de transport qui augmentent la précision des calculs des émissions routières. Par exemple, inclure les différents types de véhicules utilisés dans les choix proposés à l'utilisateur ou même donner la possibilité à l'utilisateur d'entrer son modèle de voiture qui augmentera encore plus la précision des calculs.
- Inclure des modules simplifiés, peut-être en temps réel, de calcul de l'empreinte carbone des déplacements des utilisateurs suite à la confirmation de leurs trajets et des moyens de transport empruntés. Cette suggestion pourrait stimuler l'intérêt des utilisateurs à valider leurs modes de transport avec précision, tout en les sensibilisant à l'impact de leurs choix de modes de transport sur les changements climatiques.
- Afin d'augmenter les capacités de l'application à nous fournir des données précieuses, il est conseillé d'ajouter d'autres périodes d'échantillonnage en les répartissant sur des saisons différentes comme l'été (canicules, fortes pluies, vacances estivales) et l'hiver (froids intenses, tempêtes de neige). L'idéal, bien sûr, serait de travailler sur une année complète.

CONCLUSION

Le présent rapport a porté sur le problème de la précision et de la certitude des inventaires des gaz à effet de serre dans le transport routier ainsi que sur le manque de résolution spatiale et temporelle, qui empêchent de faire le lien entre les facteurs affectant les activités routières et les émissions. La question qui en ressort est de savoir s'il serait possible d'utiliser les données géographiques des déplacements des citoyens sur l'agglomération montréalaise pour calculer leurs kilométrages parcourus sur le réseau routier et, par la suite, leurs émissions de gaz à effet de serre afin d'augmenter la précision et de limiter les incertitudes sur ces inventaires. L'objectif général de la recherche consiste à développer une méthodologie pour quantifier les émissions de GES du transport routier basée sur l'approche Ascendante et étudier le changement de comportement des citoyens avec certains paramètres comme le climat.

Notre étude a permis de constater que la méthodologie développée tout le long de ce projet n'a pas réussi à éliminer les incertitudes révélées par la méthodologie appliquée actuellement par la Ville de Montréal pour quantifier les GES du transport routier. Cependant, notre méthodologie, basée sur l'approche Ascendante, présente des points forts et prometteurs comme la facilité à manipuler les données avec des outils disponibles, le développement d'un portrait beaucoup plus détaillé des émissions liées au transport en améliorant la résolution spatiale et temporelle et la compréhension des effets de différents facteurs sur les émissions comme les aléas climatiques etc... L'utilisation de l'application MTL Trajet comme source de données pour notre méthodologie nous a permis de tester son efficacité. Les différentes limites, qui proviennent principalement de la pondération et de l'extrapolation des données de l'application, ont compromis la précision des résultats obtenus. Il existe alors plusieurs pistes d'amélioration et de recommandations concernant la collecte des données GPS par l'application.

Dans un autre aspect de notre recherche et en utilisant les données fournies par MTL trajet, nous avons étudié la résilience des citoyens envers le transport en tenant compte des variables

telles que les conditions climatiques. Parmi les conclusions tirées sur ce sujet nous citons le fait que les aléas climatiques produisent des effets sur les habitudes des utilisateurs de l'application, que ce soit l'augmentation ou la diminution de l'utilisation des différents modes de transport (actif, collectif, etc..). En outre, en étudiant les densités de la population, nous avons constaté que différents facteurs temporels comme les journées de fin de semaine, les journées du cours de la semaine ou les heures de pointe affectent le taux de concentration des citoyens sur certaines zones de l'agglomération montréalaise.

RECOMMANDATIONS

La recommandation principale qui dérive de notre recherche concerne le fait que les résultats annuels des gaz à effet de serre qui proviennent du transport routier doivent s'obtenir avec une méthodologie améliorée, laquelle peut être fournie à l'aide d'une approche Ascendante plus précise et qui augmente largement la résolution spatio-temporelle. Il existe divers outils et modèles permettant d'estimer les émissions dans le monde entier. Les régions peuvent avoir des caractéristiques, des compositions de flotte et des environnements différents, et nécessitent des méthodologies ou des modèles adaptés. Ces derniers auront besoin de données d'entrées étendues pour leurs mises en œuvre, principalement des données d'activités routières précises ainsi que des données météorologiques. De ce fait, la combinaison de l'utilisation de MTL Trajet et de l'un des modèles de calcul d'émission est considérée comme une potentielle amélioration de méthodologie.

Nous proposons le MOtor Vehicle Emissions Simulator (MOVES) développé par l'Office of Transportation de l'Agence américaine pour la protection de l'environnement (USEPA) et Qualité de l'air (OTAQ) comme outil de modélisation d'émissions de GES. Il est capable d'estimer les polluants, les émissions de gaz à effet de serre, les substances toxiques dans l'air et la consommation d'énergie des véhicules routiers et hors route. MOVES est un modèle d'émissions très complet et raffiné, qui nécessite des données d'entrée étendues pour sa mise en œuvre. La précision de chaque ensemble de données peut avoir une influence significative sur les résultats (Koupal et al. 2014).. Les ensembles de données d'entrée des utilisateurs qui peuvent être importés via un panneau de gestion des données sont :

- Nombre de véhicules pour chaque type de véhicule
- Les distances annuelles parcourus par les véhicules (VMT/VKT)
- Les type du carburant et la proportion des différents carburants utilisés
- La répartition des âges des véhicules pour les différentes classes de véhicules
- Les détails du programme d'inspection/entretien

- La température et l'humidité moyennes horaires au cours des mois
- La fraction de rampe ou la proportion du temps que le véhicule passe sur les rampes
- La répartition de la vitesse horaire moyenne pour les différents types de véhicules et de routes.

Il existe une base de données par défaut intégrée dans le modèle pour les États-Unis ; il est donc fortement recommandé de développer et d'utiliser un ensemble de données propres au cas canadien et dans notre cas montréalais. De ce fait, la combinaison des données de MTL Trajet et MOVES s'avère très efficace et peut potentiellement créer une méthodologie d'estimations d'émissions de GES du transport routier qui fournit des résultats précis et limités en incertitudes. Il faut remarquer que parmi les données d'entrée requises par MOVES, nous trouvons des données qui peuvent être livrées par l'application MTL Trajet suivant notre méthodologie, comme : les distances parcourues par les véhicules, la répartition des âges des véhicules pour les différentes classes de véhicules, nombre de véhicules pour chaque type de véhicules et la répartition de la vitesse horaire moyenne pour les différents types de véhicules. Les autres données d'entrée feront, peut-être, l'objet d'une recherche approfondie de données. Comme données de sortie, MOVES est capable d'estimer les polluants, les émissions de gaz à effet de serre, les substances toxiques dans l'air et la consommation d'énergie des véhicules routiers et non routiers.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Andersen Lasse G., Larsen Jesper K., Fraser Elsie S., Schmidt Bjarne, et Dyre Jeppe C. 2015. « Rolling Resistance Measurement and Model Development ». *Journal of Transportation Engineering* 141(2):04014075.
- André, Jean-Marc, et Robert Joumard. 2005. *Modelling of cold start excess emissions for passenger cars*.
- Anon. s. d. « Ministère du développement durable ».
- Anon. s. d. « NASA GISS: Science Briefs: Greenhouse Gases: Refining the Role of Carbon Dioxide ». Consulté 18 septembre 2019b (https://www.giss.nasa.gov/research/briefs/ma_01/).
- Association des véhicules électriques de Québec. 2020. *Statistiques SAAQ-AVÉQ sur l'électromobilité au Québec en date du 31 mars 2020*.
- Australian Academy of Science. s. d. « 1. What is climate change? | Australian Academy of Science ». Consulté 6 février 2020 (<https://www.science.org.au/learning/general-audience/science-climate-change/1-what-is-climate-change>).
- Autorité régionale de transport métropolitain. 2018. *Enquête origine destination*.
- Barbusse, Stéphane, Denis Clodic, et Jean-Pierre Roumégoux. 1998. « Climatisation automobile, énergie et environnement ». *Recherche - Transports - Sécurité* 60:3-18.
- Bielaczyc, P., A. Szczotka, P. Pajdowski, et J. Woodburn. 2011. « Development of Vehicle Exhaust Emission Testing Methods - BOSMAL's New Emission Testing Laboratory ». *Silniki Spalinowe* R. 50, nr 1:3-12.
- Boere, Stijn. 2014. « Prediction of Road Texture Influence on Rolling Resistance ». 128.
- Brand, Christian, Anna Goodman, et David Ogilvie. 2014. « Evaluating the impacts of new walking and cycling infrastructure on carbon dioxide emissions from motorized travel: a controlled longitudinal study ». *Applied energy* 128:284-95.
- Brand, Christian, Anna Goodman, Harry Rutter, Yena Song, et David Ogilvie. 2013. « Associations of Individual, Household and Environmental Characteristics with Carbon Dioxide Emissions from Motorised Passenger Travel ». *Applied Energy* 104:158-69.
- Breton, M.-P., Cloutier, G., et Waygood, E.O.D. 2017. *Risques climatiques et pratiques en matière d'adaptation – Pour le secteur canadien des transports 2016*.

- Canada, Environnement et Changement climatique. 2017. « Émissions de gaz à effet de serre : facteurs et incidences ». *aem*. Consulté 2 mars 2020 (<https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/indicateurs-environnementaux/emissions-gaz-effet-serre-facteurs-incidences.html>).
- Climate, Nasa. 2020. « Global Temperature | Vital Signs – Climate Change: Vital Signs of the Planet ». *Climate.nasa.gov*. Consulté 6 février 2020 (<https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>).
- Frank, Lawrence D., Michael J. Greenwald, Steve Winkelman, James Chapman, et Sarah Kavage. 2010. « Carbonless Footprints: Promoting Health and Climate Stabilization through Active Transportation ». *Preventive Medicine* 50 Suppl 1:S99-105.
- GHG Protocol. 2017. « Emission Factors from Cross-Sector Tools ».
- Gouvernement du Canada. 2019. « Comprendre les cotes de consommation de carburant | Ressources naturelles Canada ». Consulté 11 février 2020 (<https://www.rncan.gc.ca/energie/efficacite/efficacite-energetique-pour-les-transport-et-carburants-de-remplacement/guide-de-consommation-de-carburant-2019/comprendre-les-cotes-de-consommation-de-carburant/21007>).
- Gouvernement du Québec. 2020. « Engagements du Québec ». Consulté 28 février 2020 (<http://www.environnement.gouv.qc.ca/changementsclimatiques/engagement-quebec.asp>).
- Grande-Bretagne, et Department for Transport. 2009. *Low Carbon Transport: A Greener Future, a Carbon Reduction Strategy for Transport*. London: Stationery Office.
- Hansen, J. E., & Schmunk, R. B. 2011. *GISS Surface Temperature Analysis*. N.A.S.A.
- Karmalkar, Ambarish V., et Raymond S. Bradley. 2017. « Consequences of Global Warming of 1.5 °C and 2 °C for Regional Temperature and Precipitation Changes in the Contiguous United States » édité par J. A. Añel. *PLOS ONE* 12(1):e0168697.
- Koupal, John, Timothy DeFries, Cindy Palacios, Scott Fincher, et Diane Preusse. 2014. « Motor Vehicle Emissions Simulator Input Data: Evaluation and Sensitivity Analysis of Data Submitted for 2011 National Emissions Inventory ». *Transportation Research Record*.
- la Ville de Montréal. 2018. « FAITS SAILLANTS DES RÉSULTATS 2017 ».
- La Ville de Montréal. 2019. « INVENTAIRECOLLECTIVITEGES_2015.pdf ». Consulté 6 février 2020

(http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/ENVIRO_FR/MEDIA/DOCUMENTS/INVENTAIRECOLLECTIVITEGES_2015.PDF).

La Ville de Montréal, Ville de. 2017. « MTL Trajet ». Consulté 22 janvier 2020 (<http://localhost:4000/mtltrajet/faq/>).

Metz, B. 2010. *Controlling climate change*.

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE, CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES, et Gouvernement du Québec. 2019. « Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2017 et leur évolution depuis 1990 ». 44.

Ministère des Transports. 2018. *Le camionnage au Québec*.

Ministère du développement durable, de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques, et Direction générale de la réglementation carbone et des données d'émission. 2018. *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2015 et leur évolution depuis 1990*.

Phillip Davis. 2016. « Mastering QGIS ». 679.

Pierre Blais. 2004. « Guide de bonnes pratiques - La réduction des émissions de gaz à effet de serre et l'aménagement du territoire ». *aménagement du territoire* 71.

Société de l'assurance automobile du Québec (SAAQ). 2019. « Banque de données des statistiques officielles ». Consulté 15 avril 2020 (https://www.bdso.gouv.qc.ca/pls/ken/ken213_afich_tabl.page_tabl?p_iden_tran=REPERVN5J2V12-16443300633503_Q&p_lang=1&p_m_o=SAAQ&p_id_ss_domn=718&p_id_raprt=3372#tri_age=1&tri_tertr=0).

TELUS. s. d. « TELUS Insights - Big Data Solutions & Analytics - TELUS Business ». Consulté 2 mars 2020 (<https://www.telus.com/en/bc/business/medium-large/enterprise-solutions/big-data-analytics>).

Tong, H. Y., W. T. Hung, et C. S. Cheung. 2000. « On-Road Motor Vehicle Emissions and Fuel Consumption in Urban Driving Conditions ». *Journal of the Air & Waste Management Association* 50(4):543-54.

Transports Canada. 2011. *LES TRANSPORTS ACTIFS AU CANADA*.

- Weilenmann, Martin, Jean-Yves Favez, et Robert Alvarez. 2009. « Cold-Start Emissions of Modern Passenger Cars at Different Low Ambient Temperatures and Their Evolution over Vehicle Legislation Categories ». *Atmospheric Environment* 43(15):2419-29.
- Whitmore, J. & Pineau. 2020. *État de l'énergie au Québec 2020. Chaire de gestion du secteur de l'énergie, HEC Montréal, préparé pour Transition énergétique Québec, Montréal.*
- World Resources Institute. 2014. *Greenhouse Gaz Protocol.*