

Titre: Quel est le potentiel des véhicules électriques pour atteindre les cibles de réduction de gaz à effet de serre ? Le cas de Montréal, Canada
Title:

Auteur: Pierre Christophe Marc Laffont
Author:

Date: 2021

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Laffont, P. C. M. (2021). Quel est le potentiel des véhicules électriques pour atteindre les cibles de réduction de gaz à effet de serre ? Le cas de Montréal, Canada [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/9188/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/9188/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Owen Waygood, & Zachary Patterson
Advisors:

Programme: Génie civil
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Quel est le potentiel des véhicules électriques pour atteindre les cibles de
réduction de gaz à effet de serre ? Le cas de Montréal, Canada**

PIERRE CHRISTOPHE MARC LAFFONT

Département de génies civil, géologique et des mines

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
Génie civil

Août 2021

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Quel est le potentiel des véhicules électriques pour atteindre les cibles de réduction de gaz à effet de serre ? Le cas de Montréal, Canada

présenté par **Pierre Christophe Marc LAFFONT**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Catherine MORENCY, présidente

Owen WAYGOOD, membre et directeur de recherche

Zachary PATTERSON, membre et codirecteur de recherche

Martin TRÉPANIÉ, membre

RÉSUMÉ

Les véhicules électriques représentent un potentiel élevé de réduction des émissions directes de gaz à effet de serre (GES) par les véhicules au Québec. En effet, l'électricité dans cette province est produite en grande partie grâce à l'énergie hydraulique. Les émissions de GES liés à cette production sont très basses, ce qui diminuerait l'impact environnemental lié à la circulation de ces véhicules sur les routes québécoises.

Cependant, il est difficile de prévoir combien de remplacements de véhicules conventionnels (VC) par des véhicules électriques (VE) seraient nécessaires pour atteindre une certaine cible de réduction des émissions. En effet, les émissions moyennes au km des VC au Québec sont différentes, ainsi que leurs utilisations.

Ce mémoire a pour but de répondre à ce problème en s'intéressant à la région du Grand Montréal. L'objectif est de calculer selon différents scénarios quels véhicules devraient être remplacés par des VE pour atteindre la cible de réduction des GES de 37,5% par rapport aux niveaux de 1990 d'ici 2030.

Pour ce faire, un portrait de la flotte des véhicules particuliers à Montréal en 2018 a d'abord été dressé. Les émissions de cette flotte ont ensuite été calculées pour servir de référence aux calculs suivants. Après cela, cinq scénarios de modification de la flotte ont été simulés pour atteindre les objectifs d'émission provinciaux en 2030. Les remplacements de véhicules selon ces scénarios sont nommés aléatoire, efficient, optimiste, non efficient et pessimiste. Finalement, pour pouvoir comparer ces chiffres aux données connues, l'évolution du nombre de véhicules sur les routes québécoises jusqu'en 2030 a été estimée à partir des données de ventes des années passées. Les prévisions et objectifs de différents acteurs tel que l'association des véhicules électriques du Québec (AVEQ) ou le gouvernement du Québec ont aussi été ajoutés à ces données.

Les simulations des cinq scénarios montrent que les changements à apporter à la flotte sont loin d'être négligeables si la possession de VE est le seul levier utilisé pour réduire les émissions. Le scénario optimiste, dans lequel les plus gros émetteurs (dioxyde de carbone (CO₂) émis au km et distances parcourues élevés) sont remplacés en priorité, prévoit un remplacement d'environ 49% de la flotte en 2030 par des VE. Le scénario pessimiste, qui peut correspondre au remplacement des véhicules faiblement émetteurs et circulant peu, prévoit un remplacement de 73% de la flotte en 2030 par des VE.

L'extrapolation des ventes passées de VE pour 2030 semble indiquer que la trajectoire actuelle des ventes ne permettra pas d'atteindre les valeurs de remplacement calculées. En effet, les modèles dont les prévisions montréalaises donnent un nombre de VE proche de celui nécessaire pour atteindre les objectifs provinciaux semblent surestimer les ventes au niveau provincial. À l'inverse, celui dont les prévisions correspondent aux prévisions gouvernementales pour la province ne prévoit pas un nombre suffisant de VE à Montréal en 2030.

ABSTRACT

Electric vehicles have a great potential to reduce tailpipe greenhouse gas emissions in the province of Quebec. In this region, electricity is produced from hydropower. Thus, carbon intensity of electricity in Quebec is very low. That would considerably reduce transport-based emissions of such vehicles.

However, it is not clear how many vehicles would need to change to electric in order to meet specific reduction targets. As a matter of fact, conventional vehicles' emissions per km are different, as well as how much they are used.

This master's thesis aims to resolve this problem in the Greater Montreal region. The objective is to estimate variations in the number of vehicles in the fleet that would need to change to electric vehicles in order to achieve the provincial greenhouse gases emission reduction target of reducing 1990 CO₂ emissions by 37.5% by 2030.

To do this, Montreal's personal vehicle fleet in 2018 was first described. Then its direct emissions were calculated to create a baseline. After that, five scenarios depicting changes in the Montreal fleet were studied with respect to reaching the provincial emission objective by 2030. The five scenarios are named random, efficient, optimistic, inefficient, pessimistic. Finally, Electric vehicle sales from previous years were used to estimate the increase in numbers of electric vehicles on the roads in the province and in the Greater Montreal region, to compare these values to the ones calculated by the five scenarios. Forecasts and objectives by some stakeholders like the Quebec's electric vehicles association or the government of Quebec were also added to this data.

Simulations using the five scenarios show that the necessary changes are far from negligible if electric vehicle ownership is the only emissions reduction strategy. The most optimistic scenario in which the largest emitters are converted to electric vehicles first shows that roughly 49 % of the fleet would need to change in the 2030 fleet. The most pessimistic scenario, which can be interpreted as the replacement of smaller vehicles with low usage by electric vehicles, estimates that almost 73% of the fleet would need to be converted to electric vehicles.

The use of the previous sales to predict future electric vehicle ownership by 2030 does not seem to show that the current sales rate will reach the replacement values calculated by the five scenarios. Actually, models whose previsions for Montreal's 2030 electric vehicles match

the amount needed to reach provincial objectives seem to overestimate sales at the provincial level. Inversely, the one whose predictions match government predictions at the provincial level does not forecast enough electric vehicles in Montreal in 2030.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|-----|
| RÉSUMÉ | iii |
| ABSTRACT | v |
| TABLE DES MATIÈRES | vii |
| Liste des tableaux | ix |
| Liste des figures | x |
| Liste des sigles et abréviations | xi |
| Liste des annexes | xii |
| | |
| CHAPITRE 1 INTRODUCTION | 1 |
| 1.1 Véhicule conventionnel et véhicule électrique : les différences | 1 |
| 1.2 L’objectif de ce mémoire | 2 |
| | |
| CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE | 4 |
| | |
| CHAPITRE 3 DÉMARCHE D’ENSEMBLE DU TRAVAIL DE RECHERCHE | 8 |
| 3.1 Etape 1 : Mesure de la quantité de GES émise par ces véhicules pour l’année de référence 2018 | 8 |
| 3.1.1 Les 3 principales bases de données utilisées | 8 |
| 3.1.2 Le calcul des émissions de GES | 12 |
| 3.1.3 Le calcul des émissions moyennes par secteur municipal | 16 |
| 3.2 Etape 2 : Détermination de la composition de la flotte nécessaire pour atteindre les objectifs québécois en 2030 | 22 |
| 3.2.1 Estimation des émissions de 1990 | 22 |
| 3.2.2 Création de la flotte hypothétique de 2030 | 24 |
| 3.2.3 Calcul des changements nécessaires à apporter à la flotte | 25 |
| 3.3 Etape 3 : Modélisation de l’évolution de la proportion de véhicules électriques dans la flotte montréalaise jusqu’en 2030 selon les tendances actuelles | 27 |
| 3.3.1 Données utilisées | 27 |
| 3.3.2 Méthodologie | 28 |

| | | |
|------------|--|----|
| CHAPITRE 4 | ARTICLE 1 : HOW MANY EVs ARE NEEDED TO REACH CO ₂ | |
| | EMISSION GOALS? A CASE STUDY FROM MONTREAL, CANADA | 30 |
| 4.1 | Abstract | 30 |
| 4.2 | Introduction | 31 |
| 4.3 | Background | 32 |
| 4.4 | Data used | 34 |
| 4.5 | Methodology | 36 |
| | 4.5.1 Estimation of 2018 emissions | 36 |
| | 4.5.2 Changes in the fleet | 38 |
| 4.6 | Results | 42 |
| | 4.6.1 2018 emissions | 42 |
| | 4.6.2 Number of Conventional Vehicles to be Replaced | 43 |
| 4.7 | Discussion | 47 |
| 4.8 | Conclusion | 49 |
| 4.9 | Author contribution statement | 50 |
| CHAPITRE 5 | RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES | 51 |
| 5.1 | Modélisation de la proportion de véhicules électriques dans la flotte montréalaise jusqu'en 2030 selon les tendances actuelles | 51 |
| | 5.1.1 résultats | 51 |
| | 5.1.2 Discussion | 54 |
| 5.2 | Variation des résultats avec différents facteurs d'annualisation | 55 |
| 5.3 | Variation des résultats avec différentes valeurs d'émission pour les véhicules électriques | 56 |
| CHAPITRE 6 | DISCUSSION GÉNÉRALE | 58 |
| CHAPITRE 7 | CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS | 59 |
| | 7.1 Synthèse des travaux | 59 |
| | 7.2 Limitations de la solution proposée | 59 |
| | 7.3 Améliorations futures | 61 |
| RÉFÉRENCES | | 63 |
| ANNEXES | | 69 |

LISTE DES TABLEAUX

| | | |
|-------------|---|----|
| Tableau 3.1 | Aperçu des champs principaux de l'enquête OD | 10 |
| Tableau 3.2 | Statistiques rapides sur les modes utilisés selon l'enquête OD | 11 |
| Tableau 3.3 | Aperçu des champs principaux de La base de la SAAQ | 11 |
| Tableau 3.4 | Aperçu des champs principaux de La base des Ressources Naturelles Canada | 12 |
| Tableau 3.5 | Statistiques descriptives de la base des Ressources Naturelles Canada (de 2018) | 13 |
| Tableau 3.6 | Statistiques rapides sur les déplacements après le traitement | 14 |
| Tableau 3.7 | Description des distances parcourues | 15 |
| Tableau 3.8 | Aperçu des données obtenues via la SAAQ | 21 |
| Tableau 3.9 | Valeurs d'émissions pour les différentes catégories | 21 |
| Tableau 4.1 | Overview of the data obtained from the provincial licensing authority | 35 |
| Tableau 4.2 | Emission values and number of vehicles for the 10 emission categories | 35 |
| Tableau 4.3 | Overview of results per municipal sector | 45 |
| Tableau 4.4 | Number of vehicles which need to be replaced in order to reach the emission target | 46 |
| Tableau 5.1 | Potentiel de marché et nombre de VE sans marché potentiel fixé d'avance | 51 |
| Tableau 5.2 | Nombre de VE et pourcentage de la flotte totale avec un potentiel de marché fixé | 52 |
| Tableau 5.3 | Sensibilité des résultats par rapport au facteur d'annualisation | 55 |
| Tableau 5.4 | Sensibilité des résultats par rapport à la valeur d'émission des VE | 56 |

LISTE DES FIGURES

| | | |
|------------|--|----|
| Figure 3.1 | Méthode suivie pour attribuer la valeur d'émission à un véhicule en circulation | 18 |
| Figure3.2 | Emissions moyennes par année de construction du véhicule | 19 |
| Figure 3.3 | Répartition des véhicules de la province selon leur émission de CO ₂ au km | 20 |
| Figure 3.4 | Creation of the hypothetical 2030 fleet using two methods | 26 |
| Figure 4.1 | Creation of the hypothetical 2030 fleet using two methods | 41 |
| Figure 4.2 | Vehicle emission categories in the 2018 Montreal fleet | 42 |
| Figure 4.3 | Average CO ₂ emissions per km in Greater Montreal in 2018 | 43 |
| Figure 4.4 | Km per day and annual emissions per vehicle in Greater Montreal in 2018 | 44 |
| Figure 4.5 | Estimated fleet composition according to vehicle emission category in Montreal in 2030 | 46 |
| Figure 5.1 | Nombre de VE dans la flotte de Montréal selon les modèles de Bass et Logistique | 52 |
| Figure 5.2 | Proportion des VE dans la flotte | 53 |

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

| | |
|-----------------|--|
| AVEQ | Association des Véhicules Electriques du Québec |
| CIRAIG | Centre International de Référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services |
| CO ₂ | Dioxyde de carbone (référence pour mesurer des gaz à effet de serre) |
| GES | Gaz à Effet de Serre |
| GIEC | Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat |
| kWh | Kilowattheure (énergie consommée par un appareil d'un Watt de puissance pendant 1 heure) |
| OD | Origine-Destination |
| Pers.km | Personne-kilomètre (unité utilisée en transport pour mesurer les déplacements des personnes) |
| SAAQ | Société d'Assurance Automobile du Québec |
| VC | Véhicule(s) Conventionnel(s) |
| VE | Véhicule(s) Electrique(s) |
| Veh.km | Véhicule-kilomètre (unité utilisée en transport pour mesurer les déplacements des véhicules) |
| VH | Véhicule(s) Hybride(s) |

LISTE DES ANNEXES

Annexe A Modifications de la base des Ressources Naturelles Canada 69

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Le problème du réchauffement climatique et son lien avec les émissions humaines de CO₂ ont été abordés lors de la première conférence mondiale sur le climat à Genève en 1979 [1] et sont donc connus depuis cette date. Depuis, plusieurs accords tels que le protocole de Kyoto [2] ou encore l'accord de Paris [3] ont posé des cibles de réduction de GES pour limiter les effets des activités humaines sur le réchauffement climatique. Dans ce contexte, le Québec a donc pris l'engagement de réduire ses émissions de GES de 37,5% par rapport aux niveaux de 1990 d'ici 2030 [4].

Les véhicules personnels au Québec étaient responsables de l'émission de l'équivalent de 16 mégatonnes de CO₂ en 2019. Cela représente environ 20% des émissions totales de la province [5]. Ce secteur représente donc un levier d'action pour atteindre les objectifs de réduction fixés. Une des solutions pour réduire les émissions de cette flotte est d'y remplacer certains VC par des VE. Ce mémoire traite ainsi du lien entre la possession automobile et les émissions de GES. Plus précisément, il se concentre sur le nombre de VE dans la flotte et les émissions de CO₂ associées.

1.1 Véhicule conventionnel et véhicule électrique : les différences

Le VC et le VE ont un fonctionnement très différent. Le premier utilise l'énergie thermique récupérée par la combustion d'un carburant (gasoil, essence...) alors que le second utilise un champ magnétique créé via l'électricité stockée dans sa batterie [6]. Ces deux technologies ont donc des impacts différents lorsqu'elles sont utilisées. Pour mieux comprendre ces impacts, le centre international de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG) a dressé une analyse de cycle de vie comparative entre les VE et les VC au Québec [7].

Le but de cette analyse est de lister les impacts de ces deux technologies selon plusieurs catégories. Parmi ces impacts, on retrouve par exemple les impacts sur la santé humaine, sur l'épuisement des ressources minérales ou encore sur le changement climatique. La catégorie d'impact sur les changements climatiques est celle qui représente les émissions de GES.

La comparaison de cette analyse se base sur l'utilisation d'un véhicule de 2013 parcourant 150 000 km.

Les résultats de ce rapport montrent que les impacts sur le changement climatique (donc les émissions de CO₂) du VE au Québec sont bien moindres que ceux du VC : le premier émet en

moyenne sur toute sa durée de vie 65% de CO₂ de moins que le second. En fait, les émissions de GES du VE lors de son utilisation sont négligeables par rapport aux émissions lors de sa construction. Cela est dû à la faible intensité carbone de la production électrique québécoise. En 2017, il était estimé que la production d'un kilowattheure (kWh) d'électricité par Hydro-Québec, la compagnie qui produit l'électricité de la province, émettait 34,5 grammes de CO₂ [8]. A titre de comparaison, la production d'électricité en Ontario en 2008 émettait 201 gCO₂/kWh [9]. A cette période-là, les centrales à charbon qui émettent une quantité importante de GES étaient encore en fonctionnement dans cette province [10]. La production des Etats-Unis, quant à elle, émet en moyenne 417 gCO₂/kWh [11].

Contrairement au VE dont la construction représente plus de 90% des émissions totales de CO₂, les émissions du VC viennent en majorité de son utilisation (plus de 80% des émissions totales). Ainsi, à mesure que la distance parcourue par les véhicules augmente, l'avantage du VE par rapport au VC augmente du point de vue du changement climatique.

De manière générale, le VE a moins d'impacts au Québec que le VC, excepté dans la catégorie d'impacts liée à l'épuisement des ressources minérales, dont la consommation par le VC est 25% moindre que la consommation du VE.

On pourrait aussi noter l'importance de la masse du véhicule dans les émissions de celui-ci. Par exemple, il est possible de déterminer un facteur liant la masse et la consommation d'un véhicule donné [12]. De plus, un véhicule plus petit consomme moins de matériaux.

1.2 L'objectif de ce mémoire

La conversion des VC en VE dans la province semble donc être une solution plutôt efficace pour atteindre les objectifs québécois de réduction de GES. Ainsi, ce mémoire a pour objectif de déterminer les changements de la flotte montréalaise nécessaires pour atteindre une réduction des émissions de GES de 37,5% en 2030 par rapport aux niveaux de 1990. L'étude se concentre seulement sur ce territoire pour deux raisons :

- C'est le territoire le plus peuplé de la province, qui regroupe environ la moitié de la population du Québec [13].
- Les données requises pour estimer l'utilisation des véhicules particuliers sont disponibles via l'enquête Origine-Destination (OD) quinquennale de Montréal de 2018, en plus d'autres données.

Seules les émissions directes seront étudiées. En effet les objectifs gouvernementaux considèrent pour l'instant seulement les GES émis au sein de la province. Etant donné que la production des véhicules n'est souvent pas faite sur place, elle n'est pas prise en compte dans

les calculs.

Ce document se divise en plusieurs parties : La section qui suit dresse une revue de plusieurs études de recherche réalisées jusqu'à ce jour concernant les calculs d'émissions de GES dans le transport, la modélisation de la diffusion des véhicules électriques au sein d'une flotte, ou encore les effets de certaines stratégies sur la possession automobile et les émissions de CO₂ associées. Ensuite, une description de la démarche d'ensemble du travail et de la méthodologie suivie sera réalisée. Le mémoire étant un mémoire par article, la section suivante sera dédiée à celui-ci. Cet article a été soumis pour publication à la revue TRR (Transportation Research Record du Transportation Research Board) en juillet 2021 et s'intitule "How many EVs are needed to reach CO₂ emission goals? A case study from Montreal, Canada". Il traite du nombre de véhicules à remplacer par des VE d'ici 2030 pour atteindre les objectifs provinciaux de réduction des émissions de CO₂. La version utilisée ici est celle qui a été soumise à la revue, à laquelle quelques modifications supplémentaires ont été apportées. Après celui-ci, des résultats complémentaires seront abordés. Le travail sera finalement discuté, avant de conclure.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Cette revue de littérature se concentre sur les méthodes déjà utilisées pour calculer des émissions de CO₂ et pour étudier les stratégies permettant de les réduire en utilisant des VE par exemple. Il est tout de même nécessaire de rappeler que la stratégie visant à remplacer des VC par des VE n'est pas la seule permettant de réduire les émissions de GES. La politique de mobilité durable du Québec [14] classe d'ailleurs ces stratégies de réduction parmi trois catégories : "Réduire", "Transférer" et "Améliorer". L'approche "Réduire" concerne les réductions des besoins de déplacements, que ce soit en longueur ou en fréquence. L'approche "Transférer" consiste à changer de mode de déplacement, de la voiture à des modes actifs ou au transport en commun par exemple. Finalement, l'approche "Améliorer" vise plutôt à rendre les moteurs ou les technologies utilisées par les véhicules plus efficaces et moins émettrices de GES. C'est à cette catégorie-là que la stratégie de remplacement des VC par des VE est associée. Nous allons étudier plus en détail cette stratégie dans la revue de littérature qui suit.

De nombreux travaux de recherche ont déjà été consacrés aux émissions de GES par le transport de personnes et la mobilité individuelle. D'autres se sont plus concentrés sur la modélisation de l'entrée des VE sur le marché.

Les recherches concernant les émissions liées à la mobilité individuelle incluent par exemple [15, 16], ou d'autres articles moins récents comme ceux de [17–19]. Ce type de recherche se concentre en général sur les émissions en utilisant différents modes de transport, et en étudiant les variations spatiales de ces émissions. Cependant, les VE en particulier ne sont pas au centre de ces recherches. L'idée d'étudier leur évolution en nombre ou alors leur potentiel de réduction des GES n'est pas l'objectif central. Malgré le fait que ces articles étudient le plus grand nombre possible de modes différents, le niveau de détail par mode n'est pas assez précis pour pouvoir estimer combien de véhicules et lesquels devraient être remplacés pour atteindre un certain niveau d'émission.

Deux équations principales peuvent être extraites de ces articles pour calculer les émissions de CO₂ d'un déplacement donné. La première, tirée de [18] apparaît assez directe (équation 2.1). Elle nécessite pour le calcul de connaître la distance parcourue (d), l'efficacité énergétique par km du mode utilisé pour le déplacement (f) et un facteur de conversion des kWh en CO₂ émis (k). Le temps passé au repos par le véhicule utilisé est aussi utile pour calculer l'impact du démarrage à froid. La quantité totale de GES émise est donc la multiplication de ces

trois termes. Cependant, la complexité de cette équation se cache dans le facteur d'efficacité énergétique (f), qui demande de connaître l'énergie utilisée par tous les modes de transport et le nombre moyen de passagers pour chacun d'eux.

$$GHG = d \times f \times k \quad (2.1)$$

La deuxième équation, utilisée par [15, 17, 19] est basée sur des données désagrégées sur les véhicules personnels et des valeurs moyennes pour les bus (équation 2.2). Ici, les GES totaux émis sont la multiplication de la consommation de carburant moyenne (FCR) du véhicule utilisé, d'un facteur de correction de vitesse (SCF), d'un facteur d'émission (EF) et de la distance parcourue lors du déplacement (D). Le total est aussi divisé par le nombre de personnes dans le véhicule pendant le déplacement (NP) car l'objectif est de donner une émission de CO_2 par personne-kilomètre (pers.km). La formule peut varier un peu selon les articles. Par exemple, une certaine étude [15] a été en mesure de savoir avec précision quelle partie des déplacements multimodaux était faite avec un mode motorisé. La distance totale D de l'équation 4.2 a donc été remplacée dans cette étude par la distance motorisée seulement.

$$GHG = \frac{FCR \times SCF \times EF \times D}{NP} \quad (2.2)$$

D'autres méthodes existent pour estimer les émissions des véhicules particuliers au Québec. Le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) [20] propose par exemple de faire le calcul en utilisant le carburant vendu dans l'ensemble des stations service. Le résultat est donné en faisant le produit de la quantité de carburant vendu par le facteur d'émission correspondant au carburant étudié, pour chaque type de carburant. Cette méthode peut donner une bonne estimation des émissions totales, mais devient beaucoup plus difficile à utiliser pour estimer les variations d'émissions de GES d'une flotte, car le lien avec les véhicules utilisant le carburant n'est pas disponible.

Les recherches concernant la diffusion des véhicules électriques au sein d'une flotte ou l'évolution du marché associé dans une zone donnée peuvent utiliser des approches différentes. Par exemple, [21, 22] utilisent le coût total de possession (total cost of ownership en anglais) des véhicules pour prédire les évolutions du marché. En d'autres termes, ce type d'approche fait un bilan des coûts de chaque véhicule disponible pour différents profils de personnes, puis suppose que ces personnes vont choisir l'alternative la moins chère. Cela permet de créer des profils d'évolution d'une flotte de véhicules. Par exemple, [21] étudie le coût total de possession du point de vue de l'utilisateur lors de l'achat d'un nouveau véhicule. Cet article

a pour objectif de créer un modèle permettant de rendre compte des différences entre le coût total réel et le coût perçu par le consommateur. Il montre finalement que la faible pénétration du marché est en fait liée au manque d'information des consommateurs, et aussi à la confusion entre prix à l'achat et budget à long terme. Cependant cet article n'étudie pas le lien avec les émissions de GES. [22] adopte une approche plus large et analyse plusieurs scénarios d'évolution de la flotte automobile en Allemagne jusqu'en 2030. Ces évolutions sont ensuite comparées aux objectifs nationaux concernant le nombre de véhicules électriques dans la flotte : 1 million en 2030 et 6 millions en 2030. Les scénarios d'évolution sont créés à partir de différentes politiques telles que des incitations à l'achat ou la réduction des marges des constructeurs à la vente des nouveaux véhicules électriques. Ces politiques influencent les coûts totaux de possession des nouveaux véhicules, et donc le choix des acheteurs. Cette étude, contrairement à celle de [21], prend en considération les émissions de GES. Pourtant, ces considérations sont utilisées seulement pour évaluer les montants des taxes associées aux véhicules les plus émetteurs.

D'autres méthodes utilisées pour simuler l'évolution des marchés de VE et de VH ont été passées en revue par [23]. Cet article divise ces méthodes en trois catégories : les modèles basés agent, les modèles de choix du consommateur, les modèles de taux de diffusion de séries temporelles. Les modèles basés agent prévoient les choix de transport d'une population qui doit satisfaire des besoins donnés sous certaines contraintes, au niveau individuel. Les modèles de choix du consommateur utilisent des mesures d'utilité et des modèles logit par exemple pour prédire les choix des personnes qui se déplacent. Finalement, les modèles de taux de diffusion et ceux utilisant des séries temporelles prédisent l'évolution des marchés à une échelle macroscopique.

Certains articles combinent les deux thématiques abordées précédemment : ils analysent les impacts sur les émissions de CO₂ des changements opérés dans une flotte de véhicules. Par exemple, l'article de [24] utilise premièrement des modèles logit multinomiaux pour estimer la composition du marché selon différentes catégories de véhicules en Autriche de 2010 à 2050. Ces compositions sont estimées en fonction de certaines politiques, des évolutions des prix des carburants et des développements technologiques futurs. Il utilise ensuite les résultats d'une analyse de cycle de vie pour comparer les émissions de chaque type de véhicule associées, premièrement avec les techniques de production d'électricité actuelles, puis avec des techniques de production 100 % renouvelables. Un article de [25] étudie les VC, VH et VE dans les provinces de l'Ontario, de l'Alberta et du Québec dans le but de trouver le meilleur en termes d'émission de gaz à effet de serre dans chaque territoire. Les calculs d'émissions de GES sont ensuite appliqués à la flotte actuelle et à une trajectoire d'évolution donnée, mais il n'y a pas de lien avec les objectifs provinciaux. L'outil PEV-CIM des Ressources Naturelles Canada

est utilisé. Il permet de chiffrer, en fonction des caractéristiques d'un véhicule, les émissions associées au rechargement de la batterie ou à la consommation de carburant dans la province donnée. Cependant, ces deux articles utilisent seulement un nombre limité de véhicules pour leurs analyses, et dans l'article de [25], les hypothèses concernant la place des véhicules électriques dans les marchés futurs sont posées de manière arbitraire. L'article de [26] anticipe les comportements de déplacement en Maryland à l'aide d'un modèle utilisant la procédure séquentielle classique. C'est le modèle classique de prédiction de la demande en transport qui fonctionne en quatre étapes. Les zones de production et d'attraction des déplacements sont d'abord repérées, les déplacements des personnes sont ensuite distribués entre ces zones, les modes de transports sont choisis et enfin un calcul donne les routes empruntées lors de ces déplacements. Les auteurs combinent ce modèle avec différents scénarios de possession de VE basés sur les projections du Département des Transports du Maryland. Le rapport de [27] étudie l'évolution possible de la flotte avec un modèle multi-agent (MATSim) pour modéliser la demande individuelle et déduire par la suite les variations de la flotte. Parmi les calculs liés aux variations de la flotte, une évaluation des impacts environnementaux est faite à travers la demande énergétique ou les émissions de GES (à l'aide de la méthode du GIEC [20]). Cependant, les quatre travaux cités dans ce paragraphe ne calculent pas exactement le nombre de VC à remplacer par des VE pour atteindre un seuil d'émissions donné.

Comme nous pouvons le constater dans les paragraphes précédents, les émissions de GES, les VE, et le lien entre ces deux sujets ont été au centre de nombreux travaux. Certains cherchent à calculer les émissions de GES dans un territoire donné. D'autres tentent de prédire l'évolution du marché en s'intéressant à la question des VE. D'autres encore estiment les variations des émissions associées aux transformations des flottes de véhicules. Pourtant, il semble que la recherche n'ait pas encore essayé de calculer précisément combien de véhicules, est surtout quels véhicules, devraient être remplacés par des VE pour satisfaire les objectifs gouvernementaux de réduction de GES. C'est donc ce que tentera de faire ce travail de recherche.

CHAPITRE 3 DÉMARCHE D'ENSEMBLE DU TRAVAIL DE RECHERCHE

Comme abordé dans la section 2, ce mémoire s'axera donc autour d'un objectif principal : Déterminer les évolutions possibles des émissions de GES des véhicules particuliers à Montréal suite à l'intégration progressive de véhicules électriques au sein de la flotte pour atteindre les cibles provinciales.

Cet objectif peut être divisé en trois grandes étapes :

- étape 1. Mesurer la quantité de GES émise par ces véhicules pour l'année de référence 2018
- étape 2. Déterminer la composition de la flotte nécessaire pour atteindre les objectifs québécois en 2030
- étape 3. Modéliser l'évolution de la proportion de VE dans la flotte montréalaise jusqu'en 2030 selon les tendances actuelles

Ces valeurs seront enfin comparées pour mesurer l'ampleur des efforts à fournir si le remplacement des VC dans la flotte par ces VE était la seule stratégie adoptée pour réduire les émissions liées au transport automobile privé dans la région du Grand Montréal.

L'article inclus dans ce mémoire en section 4 traite des étapes 1 et 2. La section 5.1 donnera des résultats supplémentaires concernant l'étape 3.

Voici maintenant ci-dessous la méthodologie suivie pour cette recherche.

3.1 Etape 1 : Mesure de la quantité de GES émise par ces véhicules pour l'année de référence 2018

3.1.1 Les 3 principales bases de données utilisées

Trois bases de données ont été utilisées principalement pour estimer les émissions de CO₂ dans la région de Montréal en 2018.

L'enquête Origine-Destination

La première base de données regroupe les résultats de l'enquête OD de 2018 réalisée dans la région du Grand Montréal [28]. Cette enquête est réalisée tous les cinq ans et a pour objectif de récupérer des données concernant les déplacements des Montréalais lors d'un jour

de semaine moyen d'automne. Lors de cette enquête, 147 200 personnes ont été interrogées, et elle se répartissent parmi 73 400 ménages. Cet échantillon, qui compte pour 3,89% du nombre total de ménages du Grand Montréal, est censé représenter un portrait de la mobilité des 4,4 millions de personnes habitants la zone de 9 840 km² couverte par l'enquête [29]. Au total, 357 800 déplacements ont été enregistrés entre le 5 septembre et le 20 décembre inclus. Ce sont les déplacements faits dans la période de 24 h précédant le moment où les répondants ont été appelés. L'enquête OD est réalisée avec un échantillon aléatoire stratifié : c'est à dire que les 158 municipalités du territoire étudié ont été regroupées dans 113 secteurs municipaux qui servent comme strate d'échantillonnage. Un secteur municipal est une zone géographique de la taille d'une petite ville, dont la population est d'environ 100 000 personnes, mais peut varier entre 3 000 et 140 000 personnes.

Les variables principales à disposition sont listées dans le tableau 3.1. On peut remarquer qu'aucune variable sociodémographique n'a été utilisée dans l'étude, car le but de celle-ci est principalement de calculer les émissions de GES liées au transport. L'ajout de ce genre de détail pourrait cependant faciliter une meilleure compréhension de l'impact de ces variables sur les émissions, ces informations pourraient ainsi être utilisées dans des politiques visant à aider certains segments de population à changer de véhicule.

Le tableau 3.2 donne quant à lui des informations sur les parts modales les plus fréquentes et sur le nombre d'enregistrements de l'enquête.

On peut remarquer à la lecture du tableau 3.1 l'absence de valeurs d'émissions de CO₂ pour les déplacements, ou bien de valeurs d'émission au km pour les véhicules utilisés pour les déplacements, ou encore d'une quelconque information concernant les véhicules utilisés permettant de déduire une valeur d'émission. Il faut donc estimer ces valeurs d'émissions avec les deux bases de données suivantes.

Les bases de la SAAQ et des Ressources Naturelles Canada

Deux bases supplémentaires ont été utilisées pour estimer les émissions de GES des véhicules particuliers et donc compléter les données de l'enquête OD. La première est la base de la Société d'Assurance Automobile du Québec (SAAQ) [30]. Celle-ci donne des informations sur les types de véhicules en circulation dans toute la province. La seconde base est celle des Ressources Naturelles Canada [31]. Cette base de données peut être utilisée pour attribuer une émission de CO₂ à chaque véhicule de la SAAQ. Voici une description plus précise de ces jeux de données.

Tableau 3.1 Aperçu des champs principaux de l'enquête OD

| champ | description | utilisation dans l'étude |
|-----------|--|--------------------------|
| IPERE | identifiant unique du déplacement | Oui |
| FEUILLET | numéro de ménage | Oui |
| FACLOG | facteur d'expansion du ménage | Oui |
| XDOMI | coordonnée X du domicile | Oui |
| YDOMI | coordonnée Y du domicile | Oui |
| RANG | numéro de la personne du ménage | Oui |
| NODEPLAC | numéro du déplacement | Oui |
| SEQ_MODES | séquence des modes utilisés | Oui |
| PERS_AUTO | nombre de personnes dans l'auto lors du trajet | Oui |
| LONORIG | longitude d'origine | Oui |
| LATORIG | latitude d'origine | Oui |
| LONDEST | longitude de destination | Oui |
| LATDEST | latitude de destination | Oui |
| NB_JONC | nombre de points de jonction | Oui |
| LONJONC | longitude de la première jonction | Oui |
| LATJONC | latitude de la première jonction | Oui |
| REVENU | revenu du ménage | Non |
| AGE | âge de la personne | Non |
| SEXE | sexe de la personne | Non |
| PERMIS | possession de permis | Non |
| DATE_DPL | date du déplacement | Non |
| JOUR_DPL | jour du déplacement | Non |
| HREDE | heure du déplacement | Non |
| MOTIF | motif du déplacement | Non |

La base de la SAAQ utilisée donne la liste des véhicules immatriculés au Québec et en droit de circuler au 31 décembre 2018. Cette liste comporte les véhicules utilisés pour la promenade, pour une utilisation institutionnelle, professionnelle ou commerciale ou encore pour une utilisation hors réseau. Ces types d'utilisation sont ensuite divisés selon le type de véhicule. Les véhicules peuvent être des automobiles ou camions légers, des motocyclettes ou des habitations motorisées par exemple. Pour cette étude, seuls les automobiles et camions légers de promenade ont été pris en compte. Cette catégorie de véhicules correspond à la classe "PAU" (qui semble correspondre à "P-romenade AU-tomobile et camion léger"). En d'autres termes, ce sont les véhicules particuliers des habitants de la province. Ces véhicules représentent 72,3 % de la totalité des véhicules listés dans la base de données.

Les informations données dans ce jeu de données libre renseignent sur les caractéristiques du

Tableau 3.2 Statistiques rapides sur les modes utilisés selon l'enquête OD

| | nombre d'enregistrements | part des enregistrements |
|------------------|--------------------------|--------------------------|
| total | 393 826 | 100% |
| auto conducteur | 201 213 | 51,1% |
| auto passager | 44 636 | 11,3% |
| marche | 35 204 | 8,9% |
| autobus scolaire | 14 654 | 3,7% |
| STM | 8 234 | 2,1% |
| métro (1 ligne) | 6 644 | 1,7% |
| vélo | 5 176 | 1,3% |
| métro (2 lignes) | 3 843 | 1,0% |

véhicule et celles de son ou sa propriétaire. Par exemple, l'année du véhicule, sa marque, le nom du modèle, le nombre de cylindres, la cylindrée et la masse sont des caractéristiques du véhicule. L'âge, le sexe, et la municipalité de résidence sont des caractéristiques du ou de la propriétaire. La liste complète des attributs les plus importants est donnée dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3 Aperçu des champs principaux de La base de la SAAQ

| Champ | Description |
|-------------------|---|
| CLAS | code d'utilisation du véhicule ("PAU" ou autre) |
| TYP_VEH_CATEG_USA | type de véhicule (automobile, autobus...) |
| MARQ_VEH | marque du véhicule |
| MODEL_VEH | nom de modèle |
| ANNEE_MOD | année de construction |
| MASSE_NETTE | masse du véhicule |
| NB_CYL | nombre de cylindres |
| CYL_VEH | cylindrée (en cm ³) |
| PHYS_SEX | sexe du ou de la propriétaire |
| PHYS_AGE | âge du ou de la propriétaire |
| REG_ADM | région administrative de résidence |
| MRC | municipalité régionale de comté de résidence |
| CG_FIXE | code de municipalité de résidence |

La base des Ressources Naturelles Canada a pour objectif de donner les informations principales concernant la consommation de carburant des véhicules en ville et sur route, ainsi que des informations concernant les émissions directes moyennes de CO₂, pour tous les véhicules

que l'on peut rencontrer au Canada. Les véhicules sont divisés en plusieurs fichiers classés par année de construction. Ces années vont de 1995 à aujourd'hui. Un fichier supplémentaire est disponible pour les véhicules électriques, et un autre pour les véhicules hybrides. Les informations concernant l'année du véhicule, sa marque, le nom du modèle, le nombre de cylindres et la cylindrée sont disponibles comme dans la base de la SAAQ. En plus de cela, le type de véhicule, le type de transmission, et le type de carburant utilisé sont aussi disponibles. La liste complète des attributs ainsi que des statistiques rapides sur les champs sont données dans les tableaux 3.4 et 3.5.

Tableau 3.4 Aperçu des champs principaux de La base des Ressources Naturelles Canada

| champ | description |
|--------------------------|--|
| ANNEE | Année de construction du véhicule |
| MARQUE | Marque du véhicule |
| MODELE | Nom de modèle du véhicule |
| CYLINDREE | cylindrée du moteur (en litres) |
| CYLINDRES | nombre de cylindres |
| CATEGORIE DE VEHICULE | berline, camionnette, véhicule utilitaire sport... |
| TRANSMISSION | type de transmission |
| TYPE DE CARBU | carburant utilisé |
| CONSOMMATION EN VILLE | en L/100km |
| CONSOMMATION SUR ROUTE | en L/100km |
| CONSOMMATION COMBINEE | moyenne des consommations (en L/100km) |
| CONSOMMATION COMBINEE V2 | moyenne des consommations (en mi/gal) |
| EMISSIONS DE CO2 | en gCO ₂ /km |
| INDICE DE CO2 | indice allant de 1 à 10 |
| INDICE DE SMOG | indice allant de 1 à 10 |

On peut remarquer que cette base partage les attributs d'année, de marque de modèle, de cylindrée et de nombre de cylindres avec la précédente. Nous aborderons la jointure de ces deux bases de données plus tard, en section 3.1.3.

3.1.2 Le calcul des émissions de GES

Pour estimer les émissions de GES de Montréal en 2018, nous avons d'abord récupéré tous les trajets répertoriés dans l'enquête OD de cette même année, nous avons ensuite estimé les émissions de GES de ces trajets liées à l'utilisation de véhicules particuliers. Après ça, nous avons utilisé des facteurs d'expansion pour passer des émissions des ménages sondés à la population totale de Montréal, puis d'un jour moyen d'automne à toute l'année. Le calcul

Tableau 3.5 Statistiques descriptives de la base des Ressources Naturelles Canada (de 2018)

| | CYLINDREE | CYLINDRES | CONSOMMATION COMBINEE | EMISSIONS DE CO ₂ (gCO ₂ /km) |
|------------|-----------|-----------|--------------------------|--|
| moyenne | 3,11 | 5,60 | 10,85 | 250,04 |
| écart type | 1,33 | 1,83 | 2,69 | 56,07 |
| min | 1,0 | 3,0 | 4,1 | 96,0 |
| 25% | 2,0 | 4,0 | 9,0 | 210,0 |
| 50% | 3,0 | 6,0 | 10,5 | 246,0 |
| 75% | 3,6 | 6,0 | 12,4 | 287,5 |
| max | 8,0 | 16,0 | 22,2 | 522,0 |

est résumé dans l'équation 3.1.

$$GES_{2018} = \left(\sum_{p_{OD}} \left(\sum_{d_{p_{OD}}} \frac{D_{vp} \times FE_{veh_{SM}}}{NP} \right) \times f_{exp_{OD}} \right) \times f_{exp_{annu}} \quad (3.1)$$

Dans cette équation, on somme sur tous les déplacements ($d_{p_{OD}}$) de chaque répondant de l'enquête (p_{OD}) la valeur d'émission correspondante. Le terme D_{vp} est la distance parcourue en véhicule particulier pendant le déplacement. Le terme $FE_{veh_{SM}}$ est l'émission estimée du véhicule utilisé pour le déplacement, en gCO₂/km. Le calcul de cette émission sera abordé en section 3.1.3. Le terme NP correspond au nombre de personnes dans le véhicule, $f_{exp_{OD}}$ est le facteur d'expansion utilisé pour passer des ménages sondés à la population totale de Montréal, et $f_{exp_{annu}}$ est le facteur d'expansion utilisé pour passer du jour moyen d'automne à l'année complète.

Traitement des déplacements

Sur les 357 798 déplacements enregistrés dans la base de l'enquête OD, seule une partie a été utilisée pour calculer les émissions de GES. Ce filtre est lié aux modes utilisés pour chaque déplacement. En effet, seuls les déplacements utilisant l'automobile sont nécessaires au calcul. Dans le fichier de données, les modes utilisés sont codés dans la variable SEQ_{MODES} , qui liste la séquence de modes utilisée entre l'origine et la destination. Dans certains cas, un ou plusieurs points de jonction sont renseignés dans cette séquence, et peuvent être liés à des coordonnées. Cela permet de diviser les déplacements en plusieurs segments et ainsi récupérer ceux pour lesquels le mode utilisé est l'automobile.

Pour les déplacements sans points de jonction, seuls ceux contenant au moins un mode parmi l'automobile conducteur, l'automobile passager, le taxi ou la moto et ne contenant pas le vélo ont été retenus pour le calcul. Cela représente 247 753 déplacements. Pour les déplacements contenant des points de jonction, 7 092 contenaient un segment avec au moins un mode parmi l'automobile conducteur, l'automobile passager, le taxi ou la moto. Les segments retenus pour le calcul sont ceux incluant un des modes listés précédemment, mais excluant le vélo, le métro, l'avion, le train ou l'autobus interurbain. Ces exclusions étaient nécessaires pour écarter par exemple un segment de code '16-1' (correspondant à "avion, train ou autobus interurbain - automobile conducteur"). Cela totalise 7 104 trajets supplémentaires.

Sur l'ensemble des trajets décrits ci-dessus, 99,2% sont unimodaux et utilisent uniquement l'automobile, en conducteur ou passager. Ce pourcentage passe à 99,9% si on ajoute les trajets unimodaux comprenant le taxi et la moto. Le reste des déplacements correspond à des cas particuliers, par exemple un enchaînement "automobile passager - autobus scolaire" ou encore "mode indéterminé - automobile conducteur". L'ajout de ces déplacements dans le calcul peut être questionné, car il est difficile de déterminer quelle part du déplacement est faite en automobile, mais ceux-ci représentent moins de 0,1% des trajets. Cette décision a donc eu peu d'impact dans le résultat final.

Le tableau 3.6 présente les parts modales les plus fréquentes après traitement des trajets, et le tableau 3.7 présente une description rapide des distances calculées.

Tableau 3.6 Statistiques rapides sur les déplacements après le traitement

| | nombre d'enregistrements | part des enregistrements |
|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| total | 254 820 | 100% |
| auto conducteur | 201 185 | 79,0% |
| auto passager | 44 627 | 17,5% |
| taxi | 1 456 | 0,6% |
| auto conducteur + train | 765 | 0,3% |
| train + auto conducteur | 764 | 0,3% |
| auto conducteur + métro | 501 | 0,2% |
| métro + auto conducteur | 491 | 0,2% |
| moto | 292 | 0,1% |

Les autres facteurs de l'équation

Ce paragraphe donne du détail sur les différents facteurs composant l'équation 3.1.

Tableau 3.7 Description des distances parcourues

| | distance (en km) |
|------------|------------------|
| moyenne | 15,119 |
| écart-type | 35,515 |
| min | 0,0001 |
| 25% | 2,864 |
| 50% | 7,178 |
| 75% | 17,730 |
| max | 3 369 |

- La distance du déplacement (D_{vp}) a été estimée en calculant le trajet le plus court entre l'origine et la destination, ou bien entre les points de jonction pour les trajets qui en contenaient. Ce calcul a été réalisé avec l'API OSRM [32]. Ce serveur fonctionnant seulement sur les routes canadiennes, les distances des déplacements dont l'origine ou la destination se trouvaient à l'extérieur du Canada (qui représentent environ 0,5% des déplacements totaux) ont été calculées avec l'API HERE [33].

Certaines requêtes ont retourné des valeurs étranges, avec une distance entre une des extrémités du trajet estimé et celle demandée supérieure à 5 km. La décision a été prise d'ignorer ces 2 902 déplacements, car ils avaient pour la plupart une de leurs coordonnées nulle. Seuls deux avaient des coordonnées cohérentes, mais ceux-ci ne semblaient pas utiliser le réseau routier. Le seuil de 5 km a été choisi de façon arbitraire. Un seuil trop petit aurait amené à écarter des déplacements vers ou depuis des parcs par exemple. Une autre solution pour traiter ce problème aurait été de donner à ces déplacements une valeur d'émission correspondant à la valeur moyenne des émissions calculées des autres déplacements.

Aussi, certaines coordonnées d'origine ou de destination hors du territoire de l'enquête semblaient être dirigées vers des points précis. Par exemple, les 1273 déplacements depuis ou vers l'Etat de Maine convergeaient vers un point proche du centroïde de cet Etat. Les coordonnées de ce type de déplacement ont été utilisées sans modification, car nous ne disposons pas d'informations supplémentaires sur ces déplacements.

- Le nombre de personnes dans le véhicule (NP) est donné dans certains enregistrements de l'enquête. Pour les enregistrements où cette valeur n'était pas renseignée, une valeur moyenne a été attribuée. Cette valeur a été obtenue en moyennant les valeurs disponibles des déplacements étudiés. Elle a été supposée égale pour les déplacements en automobile conducteur et en automobile passager, car le nombre de déplacements en

automobile passager pour lequel le taux d'occupation était renseigné était trop faible (25 déplacements renseignés contre 44 000 non renseignés). L'approximation peut bien sûr être améliorée, étant donné que la valeur obtenue est de 1,35 et qu'un déplacement en automobile passager nécessite au moins deux personnes à bord. De plus, cette moyenne ne dépend ni de la géographie, ni de l'heure, ni du motif du déplacement. Faire des moyennes de taux d'occupation pour ces catégories aurait permis d'affiner le calcul.

- Le facteur d'expansion du ménage (f_{expOD}) a été récupéré dans le fichier de l'enquête OD.
- Le facteur d'expansion pour annualisation ($f_{expannu}$) a été fixé à 335 pour tous les déplacements. Cette valeur a été utilisée dans un autre travail de recherche [34] et permet d'annualiser les valeurs de l'enquête OD à Montréal. Elle a été calculée à partir des données de circulation du ministère des transports dans cette région. Cependant, il reste assez difficile d'estimer la totalité des déplacements sur une année à partir de l'enquête OD, qui prend en compte seulement les déplacements en semaine en automne. Dans la littérature, d'autres facteurs d'annualisation ont déjà été utilisés : 290 est une valeur utilisée par [35] et calculée selon des comptages dans les transports en commun. Cette valeur ne compte que les jours de semaine, donc pas les samedis et dimanches. 250 correspond au nombre de jours travaillés dans l'année. Cette valeur a par exemple été utilisée par [36].
- Le facteur d'émission (FE_{vehSM}) est la moyenne d'émission des véhicules du secteur municipal de résidence du répondant. Une valeur moyenne a été utilisée faute d'informations supplémentaires concernant les véhicules utilisés pendant les trajets. Le calcul de cette valeur est abordé en section suivante (section 3.1.3).

3.1.3 Le calcul des émissions moyennes par secteur municipal

Pour estimer les émissions moyennes des véhicules par secteur municipal, les bases de la SAAQ et des Ressources Naturelles Canada ont été utilisées. Plusieurs étapes ont été suivies pour obtenir les valeurs moyennes d'émission :

- Les bases ont d'abord suivi un pré-traitement pour pouvoir être combinées entre elles
- Les valeurs d'émission de la base des Ressources Naturelles Canada ont ensuite été attribuées aux véhicules en circulation de la base de la SAAQ
- Après cela, les véhicules ont été regroupés en différentes catégories d'émission
- Un échange avec la SAAQ nous a permis d'obtenir la répartition des véhicules montréalais dans les différentes catégories d'émission au niveau des aires de diffusion

- Finalement, les moyennes d'émission par secteur municipal a été calculée avec la répartition obtenue.

Nous allons aborder chaque point plus en détail dans les parties suivantes :

Le pré-traitement des bases de données

L'objectif de la démarche est d'établir la meilleure correspondance possible entre les véhicules en circulation et la base donnant les émissions. Les cinq attributs partagés par les deux bases sont l'année, la marque, le modèle, le nombre de cylindres et la cylindrée des modèles. Le pré-traitement a pour but de faire correspondre les valeurs de ces attributs entre ces deux bases pour pouvoir ensuite les associer correctement.

Premièrement, étant donné que les noms de marque et de modèles dans le jeu de données des véhicules en circulation sont tronqués à 5 caractères, ceux de la base d'émission l'ont donc aussi été volontairement pour correspondre à la première. Ensuite, de nombreux changements de noms ont dû être réalisés et sont listés en annexe A.

Suite à ces changements, qui apportaient certaines simplifications aux enregistrements de la base d'émission qui était plus détaillée que la base de circulation, certains enregistrements de la base des émissions possédaient les mêmes attributs d'année, de marque, de modèle, de cylindrée, et de nombre de cylindres. Ils ne pouvaient donc plus être différenciés. Ces enregistrements ont été regroupés en un seul, dont l'émission a été fixée à la moyenne des émissions des enregistrements qui le composent. Les bases de la SAAQ et de Ressources Naturelles Canada étant très différentes du point de vue de la syntaxe, des conventions d'écriture, et des abréviations utilisées, cette étape de pré-traitement a nécessité beaucoup de temps.

Attribution des émissions

La méthode utilisée pour attribuer une émission à tous les véhicules en circulation est donnée dans la figure 3.1. L'objectif est de trouver un véhicule correspondant dans la base des émissions pour un véhicule en circulation donné.

Les correspondances exactes entre les valeurs de cylindrée et de nombres de cylindres sont très rares entre les deux bases. Les attributs d'année, de marque et de modèle sont donc les attributs principaux qui ont été utilisés pour la comparaison.

De plus, certains véhicules avaient une correspondance dans des bases de types de véhicules différents. Par exemple, les KIA NIRO de 2019 peuvent être des VC, des VE, ou bien des VH. Dans ce cas, il est impossible de savoir si le véhicule de la base de la SAAQ est élec-

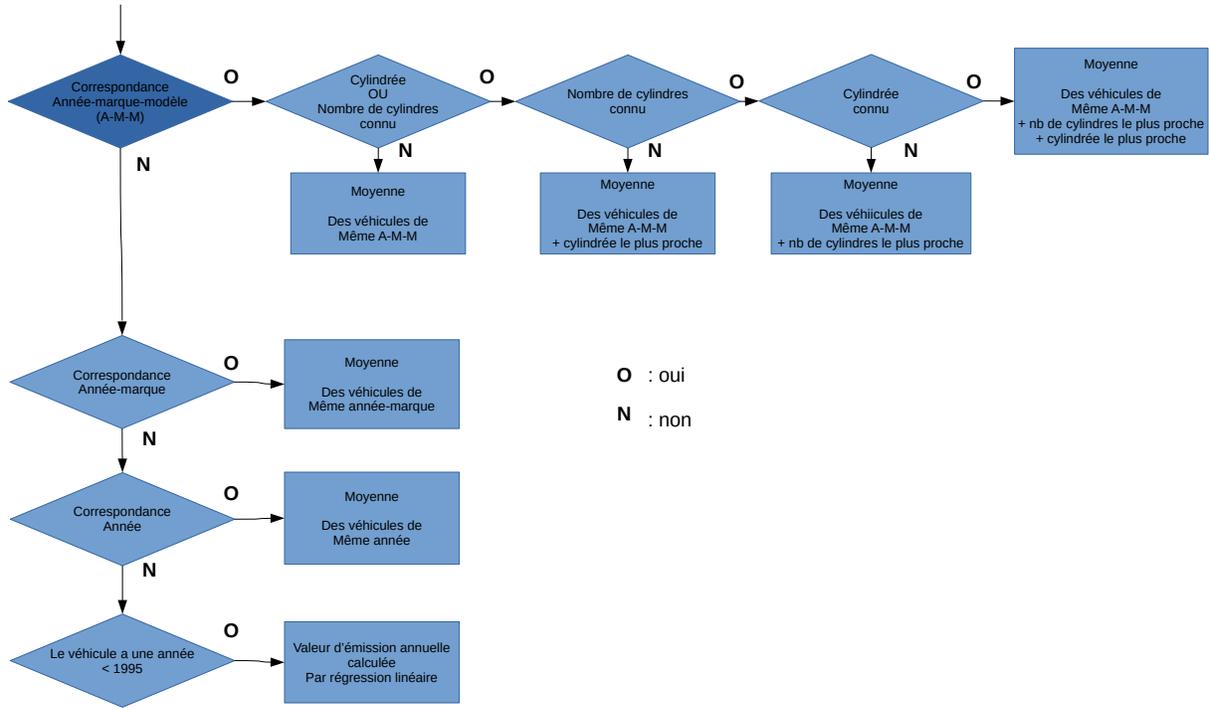


Figure 3.1 Méthode suivie pour attribuer la valeur d'émission à un véhicule en circulation

trique, hybride, ou conventionnel. Pour ces cas particuliers, la méthode décrite en figure 3.1 a été suivie pour calculer séparément les émissions de chaque type de véhicule possible, puis l'émission finale a été estimée en faisant la moyenne des émissions pondérée par la proportion de VC, VE et VH dans la flotte. Ces proportions ont été supposées à respectivement 99,2 %, 0,4 % et 0,4 % d'après [37].

Par exemple, pour un véhicule possédant une correspondance dans la base des VC, des VE, et des VH, la valeur d'émission sera calculée selon l'équation 3.2.

$$E_{final} = E_{VC} \times (1 - p_h - p_e) + E_{VE} \times p_e + E_{VH} \times p_h \quad (3.2)$$

Dans cette équation, l'émission estimée du véhicule E_{final} est la somme pondérée des émissions des VC, VE et VH correspondantes. p_h et p_e sont respectivement les proportions des VH et des VE dans la flotte de la province. Il aurait été plus précis de connaître la proportion des modèles électriques et hybrides de chaque véhicule dans la flotte pour pouvoir attribuer les émissions avec plus de précision. Aussi, les valeurs ont dû être moyennées pour rendre

compte de la diversité des types de véhicules de même nom, mais cela ne reflète pas la réalité : un véhicule est soit conventionnel, soit hybride, soit électrique et ne peut pas être de plusieurs types à la fois. Cependant, c'est cette hypothèse qui a dû être adoptée par manque d'informations supplémentaires.

Pour les véhicules dont l'année de construction est inférieure à 1995, l'émission associée a été estimée par régression linéaire, selon les émissions moyennes annuelles obtenues via la base des émissions. La figure 3.2 donne l'allure de ces émissions. Ici aussi l'estimation aurait pu être plus précise, et une valeur d'émission propre à chaque modèle antérieur à 1995 aurait pu être cherchée séparément.

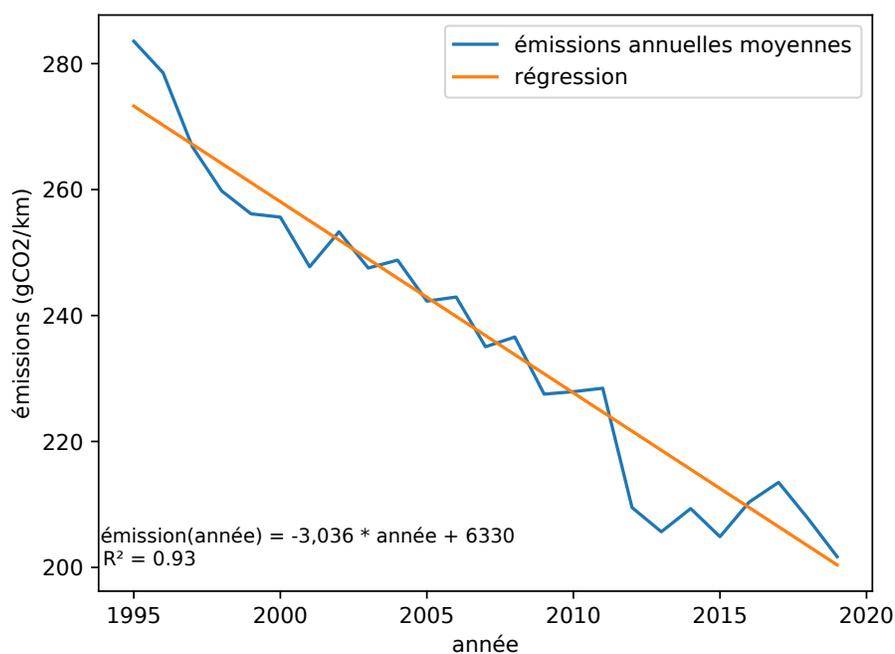


Figure 3.2 Emissions moyennes par année de construction du véhicule

Création des catégories d'émission

Après avoir associé une émission à chaque véhicule en circulation, une répartition de ces émissions a été dressée, puis les véhicules ont été regroupés en catégories. Les VE ont été regroupés ensemble, et les autres véhicules ont ensuite été regroupés en 9 catégories d'émission en utilisant la méthode des k-moyennes. L'algorithme permet d'obtenir des groupes d'émissions similaires, en minimisant l'écart à la moyenne au sein des groupes. L'erreur entre les

émissions réelles des véhicules et les émissions moyennes des catégories est donc moins grande que si les limites des catégories avaient été choisies arbitrairement.

Les calculs de la méthode des k-moyennes ont été réalisés avec le langage Python. Seule la valeur d'émission des véhicules a été utilisée dans l'algorithme pour mesurer les distances entre eux. La mesure de distance utilisée est d'ailleurs le carré de la différence d'émission. Par exemple un véhicule émettant 150 gCO₂/km sera à une distance de 100 d'un véhicule émettant 160 gCO₂/km. 500 simulations ont été calculées en initialisant les centres des catégories aléatoirement. Le résultat de répartition retenu est celui minimisant la somme des distances totales des véhicules aux centres de leurs groupes respectifs. La figure 3.3 montre la répartition des émissions des véhicules de la province en 2018 à la fin du processus. Les droites verticales caractérisent les frontières entre les différentes catégories, dont les valeurs d'émission moyennes sont données dans le tableau 3.9.

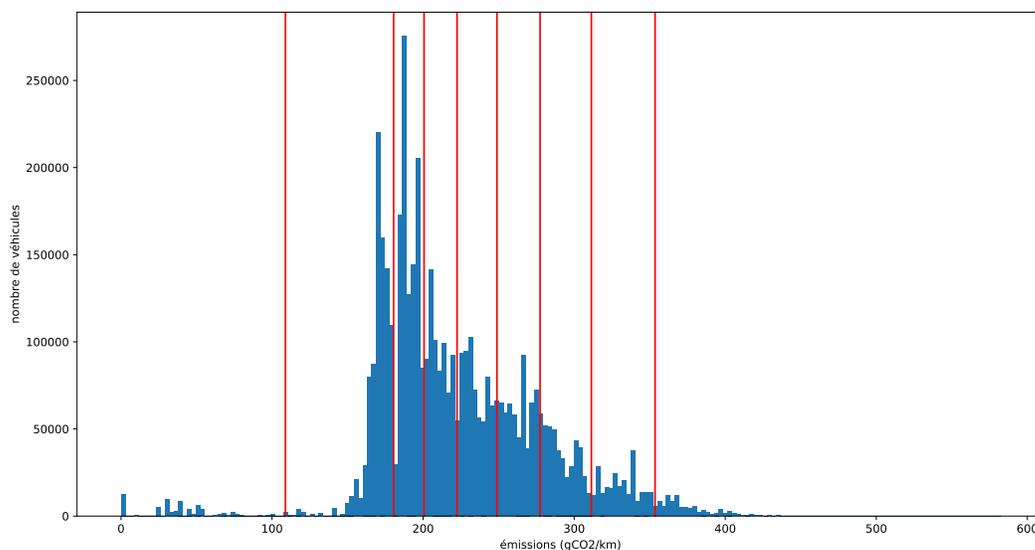


Figure 3.3 Répartition des véhicules de la province selon leur émission de CO₂ au km

Après cette étape, les émissions de tous les véhicules ont été approximées à la moyenne d'émission de leur catégorie. L'objectif de cette étape finale est d'agréger les véhicules pour pouvoir demander à la SAAQ le nombre de véhicules par catégorie pour chaque aire de diffusion en contournant le problème de confidentialité des données. Suite à cette demande, une base de données dont un aperçu est donné dans le tableau 3.8 a été obtenue. Dans ce tableau les données ont été agrégées au niveau des secteurs municipaux pour correspondre

à l'échelle d'échantillonnage de l'enquête OD. Par exemple, on peut y lire que 2317 véhicules appartiennent à la catégorie d'émission numéro 2 dans le centre-ville périphérique de Montréal.

Tableau 3.8 Aperçu des données obtenues via la SAAQ

| catégorie d'émission | ce0 | ce1 | ce2 | ce3 | ce4 |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|
| Montréal : Centre-ville | 34 | 175 | 863 | 1169 | 1112 |
| Montréal : Centre-ville périphérique | 66 | 347 | 2317 | 2881 | 2600 |
| Montréal : Sud-Ouest | 53 | 327 | 4509 | 5418 | 3880 |
| catégorie d'émission | ce5 | ce6 | ce7 | ce8 | ce9 |
| Montréal : Centre-ville | 1180 | 807 | 517 | 160 | 95 |
| Montréal : Centre-ville périphérique | 2608 | 1941 | 1276 | 425 | 186 |
| Montréal : Sud-Ouest | 3811 | 2954 | 1859 | 683 | 252 |

Le nombre de groupes a évidemment une importance sur la précision des résultats. Plus il y a de groupes, plus les valeurs d'émissions estimées sont précises. Suite à un échange avec la SAAQ, ce nombre a été fixé à 10. Il pourrait cependant être plus élevé tout en respectant les enjeux de confidentialité.

Les valeurs d'émission correspondant à chaque catégorie sont données dans le tableau 3.9

Tableau 3.9 Valeurs d'émissions pour les différentes catégories

| catégorie d'émission | ce0 | ce1 | ce2 | ce3 | ce4 |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Emission (gCO ₂ /km) | 6,9 | 47,6 | 170,2 | 190,8 | 210,5 |
| catégorie d'émission | ce5 | ce6 | ce7 | ce8 | ce9 |
| Emission (gCO ₂ /km) | 234,5 | 263,3 | 291,6 | 331,2 | 375,9 |

Comme expliqué au début de cette section, les VE ont été regroupés ensemble dans la catégorie 0. Leurs émissions directes de CO₂ sont nulles, pourtant la valeur d'émission du tableau 3.9 est égale à 6,9 gCO₂/km. Cette valeur est en fait une estimation des émissions de GES liées à la production d'électricité nécessaire au fonctionnement du véhicule. Le calcul donne l'émission au km d'un véhicule électrique consommant 20 kWh pour 100 km avec la valeur d'émission de GES de 34,5 gCO₂/kWh par la province en 2017 [8]. La valeur de 20 kWh/100km correspond à la consommation d'une Tesla modèle S d'après [38]. Ce même article montre que certains VE peuvent consommer 15 kWh/100km ou bien 30 kWh/100km. La

valeur de 20 a été choisie arbitrairement pour cette étude. Les émissions liées à la production et au transport du carburant pour les autres catégories de véhicules ont été négligées. Cette hypothèse simplificatrice est assez forte, étant donné que le rapport du CIRAIG [7] cité en section 1 montre que parmi les émissions de CO₂ du VC étudié pendant son utilisation, environ 20% étaient liées à la production du carburant et à son transport vers le consommateur. La prise en compte de ces émissions supplémentaires élèverait les émissions des véhicules particuliers de Montréal, mais il serait plus difficile de savoir quelle part de ces émissions a été émise dans la province.

Calcul des moyennes d'émission par secteur municipal

A partir de la base des tableaux 3.8 et 3.9, il est donc possible de calculer une moyenne d'émission par secteur municipal, en utilisant l'équation 3.3.

$$FE_{veh_{SM}} = \sum_g \frac{n_g \times FE_g}{n_{tot}} \quad (3.3)$$

Dans cette équation, g fait référence aux 10 groupes d'émission des véhicules. Le facteur n_g est le nombre de véhicules dans le groupe g dans le secteur municipal étudié, et n_{tot} le nombre total de véhicules dans le secteur municipal. Le facteur FE_g est le facteur d'émission correspondant au groupe d'émission g accessible dans le tableau 3.9.

3.2 Etape 2 : Détermination de la composition de la flotte nécessaire pour atteindre les objectifs québécois en 2030

Cette étape peut être découpée en plusieurs parties. Premièrement, il faut connaître la valeur d'émission de la flotte des véhicules particuliers de Montréal à atteindre d'ici 2030 pour correspondre aux attentes des objectifs de réduction provinciaux cette valeur se basant sur les émissions de 1990, les émissions de cette année doivent être estimées. Deuxièmement, les évolutions de la flotte entre 2018 et 2030 les plus probables doivent être estimées pour créer une flotte base de travail pour les calculs suivants. Finalement, le nombre de véhicules à remplacer par des VE dans cette flotte estimée pour 2030 dans le but d'atteindre les objectifs provinciaux doit être calculé.

3.2.1 Estimation des émissions de 1990

Une approche différente de celle utilisée pour 2018 a dû être suivie pour calculer les valeurs de 1990, année de base utilisée pour calculer le seuil d'émission à atteindre en 2030. Seules

des données concernant les émissions des véhicules particuliers dans la province entière [39] en 1990, ainsi que la population de la région métropolitaine de recensement de Montréal [40] et la population totale de la province [41] étaient disponibles. Des données comparables des mêmes sources l'étaient aussi pour l'année 2018.

Dans le but d'estimer des valeurs d'émission comparables entre 2018 et 1990, nous avons suivi l'approche suivante. Nous avons supposé que la différence en termes d'émission par personne entre les Montréalais et le reste de la province restait constante dans le temps. Cette hypothèse était la plus appropriée selon les données disponibles, et sachant que des recherches avaient déjà montré que les personnes dans les zones plus peuplées conduisent moins et émettent moins que les autres [18, 19]. Cette hypothèse peut être traduite en calcul par l'équation 3.4.

$$\frac{Em_{an}}{Pm_{an}} = \alpha \times \frac{Eq_{an} - Em_{an}}{Pq_{an} - Pm_{an}} \quad (3.4)$$

Dans l'équation 3.4, l'émission (E) de Montréal (m) divisée par sa population (P) pour une année (an) donnée est égale à une certaine constante (α) fois l'émission du reste de la province (la différence entre les valeurs du Québec (q) et de Montréal (m)) divisée par la population. Avec cette équation, il est possible de calculer α avec les valeurs de 2018 disponibles et la valeur d'émission de Montréal calculée en section 4.5.1. Ainsi, l'équation 3.4 peut être réarrangée pour calculer les émissions de CO₂ de la flotte des véhicules personnels à Montréal en 1990. Cela donne l'équation 3.5.

$$Em_{1990} = \frac{\alpha \times Eq_{1990} \times Pm_{1990}}{(Pq_{1990} - Pm_{1990}) + \alpha \times Pm_{1990}} \quad (3.5)$$

Cette hypothèse simplificatrice sur les taux d'émission par personne peut donner un ordre d'idée sur la valeur des émissions de 1990, mais elle prend en compte seulement les variations de deux types de valeurs entre 1990 et 2018. Le premier concerne la valeur d'émission de toute la province, qui peut par exemple prendre en compte de manière implicite l'évolution des émissions moyennes des véhicules, des comportements de mobilité ainsi que des taux de motorisation par personne au niveau provincial. Le deuxième type de valeurs concerne les variations de population, qui rendent compte des différences de variation en taille entre Montréal et le reste de la province. Cependant, certains aspects ne peuvent pas être pris en compte selon cette hypothèse. Par exemple, la composition de la population de Montréal selon différentes catégories d'âges n'est pas utilisée. Aussi, l'évolution des comportements de mobilité des Montréalais, et leurs différences avec ceux des autres québécois, sont des données

qui ne peuvent pas être récupérées dans les valeurs utilisées via cette méthode. En fait, les émissions de 1990 pour Montréal ont été estimées en supposant que les caractéristiques de la population de Montréal variaient de la même façon que celles de la population de toute la province. L'estimation des niveaux d'émission de 1990 bénéficierait donc d'une meilleure étude des comportements de mobilité entre 1990 et 2018 à Montréal, ainsi que d'une meilleure attention concernant les catégories d'âge des Montréalais entre ces deux dates par exemple.

Le seuil d'émission à atteindre pour 2030 a donc été fixé à 62,5% des émissions de Montréal de 1990.

3.2.2 Création de la flotte hypothétique de 2030

Avant de calculer le nombre de véhicules qui a besoin d'être remplacé par des VE pour pouvoir atteindre la cible provinciale de réduction des émissions de GES, la composition et la taille de la flotte de 2030 la plus probable pour chaque secteur municipal doivent être estimées. Certaines études antérieures ont déjà tenté de prédire la possession automobile, par exemple avec des modèles de choix discrets [42]. Un article de [43] s'est concentré sur le type de véhicules utilisé par les ménages, à une échelle géographique assez précise. Pour notre étude, nous avons d'abord commencé par utiliser les prévisions de population pour la région du Grand Montréal par l'institut de la statistique du Québec [44] pour l'année 2030.

Ensuite, nous avons utilisé deux méthodes illustrées sur la figure 3.4 pour estimer la composition de la flotte à laquelle on pourrait s'attendre en 2030. La première est une solution naïve : multiplier le nombre de véhicules de chaque catégorie de chaque secteur municipal par le taux d'augmentation de la population. Dans d'autres termes, cela suppose que tous les nouveaux véhicules de 2018 à 2030 seraient distribués dans les 10 catégories d'émission selon la distribution de 2018. C'est une hypothèse assez forte étant donné que cela impliquerait l'augmentation du nombre de véhicules dans les catégories les plus émettrices alors que ces catégories sont majoritairement composées de vieux véhicules, qui auront donc probablement en grande partie cessé de circuler d'ici 2030. Cependant, cette méthode est très facile à implémenter. La deuxième solution est plus complexe, et a pour origine les prédictions de population de 2030 pour le territoire de l'enquête OD. À partir de cette estimation, le nombre total de véhicules dans la région, puis leur répartition dans les 10 catégories d'émission, ont été estimés avec des valeurs obtenues en extrapolant les valeurs disponibles concernant les véhicules [30] et la population [13] de 2011 à 2018. Ces valeurs ont été obtenues par régressions linéaires. Finalement, nous avons distribué les véhicules des différentes catégories

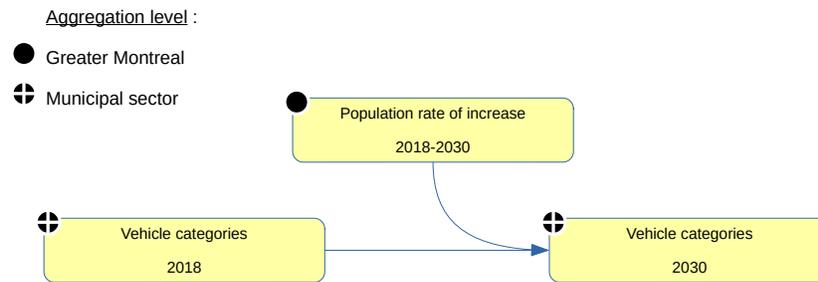
d'émission dans les secteurs municipaux selon les ratios de 2018. Cette méthode complexe est donc plus précise que la méthode naïve, mais elle reste tout de même très approximative. Premièrement, la répartition des véhicules dans les différentes catégories d'émission suit la tendance de 2011 à 2018. Il y a un écart de 12 ans entre la dernière année utilisée et l'année étudiée. Cette tendance pourrait très probablement changer entre-temps. Aussi, les approximations ont été réalisées par simple régression linéaire, en ne regardant que le nombre de véhicules dans chaque catégorie d'émission. Une prise en compte des types de véhicules en circulation (véhicules utilitaires de sport, automobiles citadines...) en plus de leur catégorie d'émission pourrait aussi préciser les résultats. De plus, des analyses utilisant des modèles de choix discrets se basant sur des données sociodémographiques comme dans l'article [42] pourrait donner un nouveau point de départ pour estimer les répartitions des véhicules dans les différentes catégories, mais estimer ces répartitions pour 2030 nécessiterait des prévisions pour les variables sociodémographiques utiles en plus des prévisions de population.

3.2.3 Calcul des changements nécessaires à apporter à la flotte

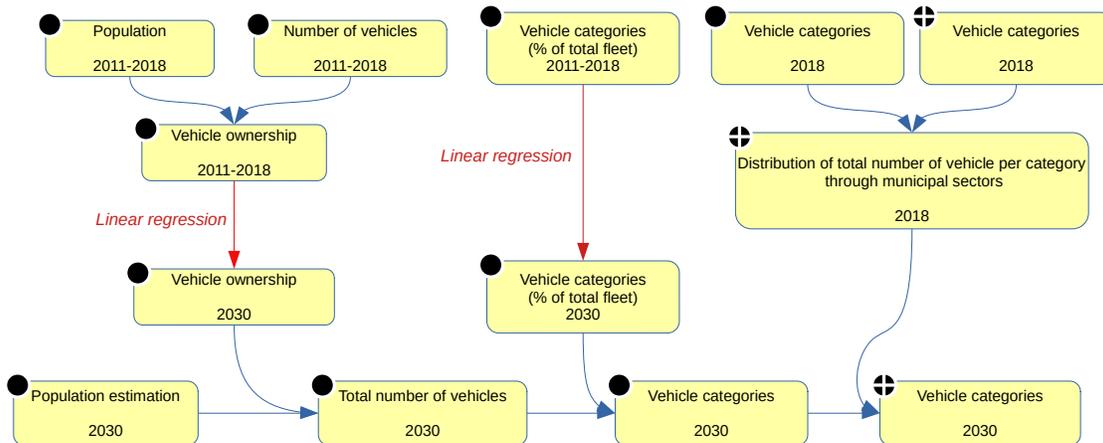
En partant d'un tableau décrivant la flotte de 2030 estimée semblable au tableau 3.8, il est donc relativement simple de simuler le remplacement de certains VC par des VE en choisissant la catégorie d'émission et le secteur municipal des VC en question. Il faut seulement soustraire au nombre de véhicules de la catégorie choisie le nombre de véhicules que l'on veut remplacer, et ajouter ce nombre à la case correspondant à la catégorie 0 (catégorie des VE) dans le secteur municipal choisi. Dans cette partie, nous avons donc réalisé ce type de changements aux deux flottes estimées en section 3.2.2 selon des règles précises données par les 5 scénarios suivants :

- 1^{er} scénario (Aléatoire) : Remplace les véhicules de manière aléatoire
- 2^{ème} scénario (Efficient) : Remplace les véhicules ayant les émissions au km les plus élevées en premier (i.e., les moteurs les moins efficaces et les plus gros véhicules)
- 3^{ème} scénario (Optimiste) : Remplace les véhicules qui émettent le plus en une année (les émissions au km sont prises en compte, mais aussi les véhicule-kilomètre (veh.km) parcourus dans les secteurs municipaux)
- 4^{ème} scénario (Non efficient) : Remplace les véhicules ayant les émissions au km les plus basses en premier
- 5^{ème} scénario (Pessimiste) : Remplace les véhicules qui émettent le moins en une année en premier

Le premier scénario, *Aléatoire*, pourrait être interprété comme résultant d'aides à l'achat de VE sans cibler des véhicules spécifiques à remplacer. Le second, *Efficient*, peut être interprété comme résultant d'une politique visant à remplacer les véhicules les plus émetteurs au km



(a) first method (naive)



(b) second method

Figure 3.4 Creation of the hypothetical 2030 fleet using two methods

par des VE. Le troisième, *Optimiste*, peut être vu comme se focalisant à la fois sur l'utilisation et sur l'efficacité du véhicule. L'avant-dernier, *non efficient*, considère que les personnes cherchant déjà des véhicules à faible émission remplaceront leurs véhicules par des VE en

premier. Finalement, le scénario *pessimiste* décrit une situation dans laquelle les individus les plus concernés par l'environnement, ayant déjà un véhicule peu émetteur et ne l'utilisant pas beaucoup, le remplaceraient par un VE en premier.

Les changements ont donc été effectués sur les flottes estimées de 2030 selon ces 5 scénarios, jusqu'à ce que les émissions des flottes associées passent en dessous du seuil voulu pour atteindre l'objectif provincial de réduction des émissions. Le calcul des émissions associées a supposé que les km parcourus par véhicule particulier dans chaque secteur municipal était resté stable de 2018 à 2030. Cette hypothèse peut être justifiée par le fait que les km parcourus par véhicule semblent avoir été relativement stables au Canada pendant les deux dernières décennies [45]. Cependant, l'augmentation de la taille de la flotte devrait faire augmenter ces veh.km, et inversement, une transition de modes de l'automobile vers les transports actifs et en commun aurait tendance à faire diminuer ces veh.km totaux par secteur municipal. Une étude de l'évolution des comportements aurait donc pu permettre une estimation des veh.km parcourus en 2030 plus précise.

3.3 Etape 3 : Modélisation de l'évolution de la proportion de véhicules électriques dans la flotte montréalaise jusqu'en 2030 selon les tendances actuelles

En plus des résultats de l'étape 2 qui calcule combien de véhicules devront être remplacés pour atteindre les objectifs provinciaux, il peut être intéressant d'utiliser les données des ventes déjà réalisées pour estimer les ventes futures, et donc prévoir le nombre de VE sur les routes montréalaises en 2030. Ces données seront comparées aux résultats de l'étape 2 pour évaluer la faisabilité des différents scénarios proposés dans ce dernier.

3.3.1 Données utilisées

Deux jeux de données ont été utilisés pour ce complément. Le premier est celui de la SAAQ [30] et des Ressources Naturelles Canada [31] déjà utilisé dans la section 3.1.3 pour les années de 2011 à 2018. Le nombre de véhicules de la catégorie d'émission 0 peut être récupéré pour chaque année. Pour rappel, cette catégorie est associée aux VE. L'AVEQ [46] a aussi rassemblé les données de la SAAQ pour faire un bilan annuel au niveau provincial des nouvelles ventes de VE. Ces données prennent aussi en compte les véhicules hybrides rechargeables. Ces données, pour les années 2011 à 2019, ont elles aussi été utilisées dans cette section. Pour résumer, ces deux jeux de données comptent le nombre de VE sur les routes à Montréal, et au Québec, pour chaque année.

3.3.2 Méthodologie

Les données décrites en section 3.3.1 peuvent être utilisées pour calibrer les modèles de série temporelles décrits dans l'article de [23]. Trois modèles peuvent être utilisés : Les modèles de Bass, de Gompertz, et Logistique. Ces trois modèles décrivent l'adoption d'une nouvelle technologie par une population, répartie en plusieurs groupes de personnes ayant différents degrés d'attraction envers cette nouvelle technologie. Les premières personnes à l'adopter sont les "innovateurs" et les "adopteurs précoces" alors que la "majorité tardive" et les "retardataires" adoptent la technologie quand elle est déjà bien diffusée dans la population. Les courbes décrivant le nombre d'adopteurs à travers le temps de ces trois modèles ont en commun leur forme de S, et un paramètre qui rend compte du potentiel de marché à long terme. Ces modèles ont déjà été utilisés pour modéliser l'adoption de VE ou de véhicules hybrides (VH) dans différents contextes [23]. L'équation 3.6 présente le modèle de Bass.

$$A(t) = \frac{M \times (1 - e^{-(p+q) \times t})}{1 + (\frac{p}{q}) \times e^{-(p+q) \times t}} \quad (3.6)$$

Dans cette équation, A représente l'adoption cumulative de la technologie étudiée au temps t et M représente le potentiel de marché. P et q rendent compte des prédispositions de la population à adopter ou non la technologie.

Les équations 3.7 et 3.8 présentent respectivement le modèle de Gompertz et le modèle des séries temporelles. L'équation de Gompertz a été récupérée de l'article de [47].

$$A(t_n) = M \times e^{-e^{-B \times (t-I)}} \quad (3.7)$$

$$A(t) = \frac{M}{1 + e^{I \times \alpha} \times e^{-\alpha \times t}} \quad (3.8)$$

Le potentiel de marché est aussi représenté dans ces deux équations. Les autres paramètres représentent les facteurs de délai (B et α) et les points d'inflexion de la courbe (I).

Les paramètres de ces trois équations seront donc estimés à partir des données brutes de la SAAQ [30] et des données de l'AVEQ [46]. Le premier jeu de données concernera uniquement la flotte du Grand Montréal étudiée jusqu'ici dans ce mémoire, alors que le deuxième représentera la flotte totale de la province. A partir de ces résultats, le nombre de VE en 2030 dans ces deux flottes pourra être estimé. Une première série de simulations sera réalisée sans fixer le potentiel de marché (facteur M dans les équations). Pour la deuxième série, nous supposeront que tous les véhicules de la flotte finiront par être électriques au bout d'un

certain temps.

Les valeurs provinciales obtenues pourront être comparées aux estimations et objectifs de l'AVEQ, d'Hydro-Québec, et du gouvernement.

CHAPITRE 4 ARTICLE 1 : HOW MANY EVs ARE NEEDED TO REACH CO₂ EMISSION GOALS ? A CASE STUDY FROM MONTREAL, CANADA

Ce chapitre est dédié à l'article soumis à la revue TRR (Transportation Research Record du Transportation Research Board) en juillet 2021. La version donnée ici est celle qui a été soumise à la revue, à laquelle quelques modifications supplémentaires ont été apportées. L'auteur principal de l'article est Pierre Laffont, et les co-auteurs sont Owen Waygood et Zachary Patterson.

4.1 Abstract

Electric vehicles (EVs) have a great potential to reduce tailpipe greenhouse gas (GHG) emissions. In locations such as the province of Quebec where electricity production is from hydropower, the carbon content of the energy is extremely low and thus transport-based emissions could be considerably reduced. However, it is not clear how many vehicles would need to change to electric in order to meet reduction targets as various considerations exist such as which vehicles will change and how those vehicles are used. In this article, to create a baseline, direct emissions by all personal vehicles in Montreal in 2018 have been calculated using data from the 2018 origin-destination (OD) survey and provincial vehicle registration. Next, five scenarios depicting changes in the Montreal fleet have been studied to calculate the corresponding variations in the number of vehicles in the fleet that would need to change to EVs in order to achieve the provincial GHG emission reduction target of reducing 1990 CO₂ emissions by 37.5% by 2030. The five scenarios are random, efficient, optimistic, inefficient, pessimistic. Simulations using the five scenarios show that the necessary changes are far from negligible if electric vehicle ownership is the only emissions reduction strategy. The most optimistic scenario (largest emitters converting to EVs) shows that roughly 49 % of the fleet would need to change. The most pessimistic scenario (smaller vehicles with low usage converting to EVs) estimates that almost 73% of the fleet would need to be converted to electric vehicles.

Keywords : electric vehicles, vehicle ownership, GHG emissions, CO₂ emissions, emission targets

4.2 Introduction

Personal vehicles in Quebec were responsible for the emission of 16 megatonnes of CO₂ equivalent in 2019. This accounts for approximately 20% of total GHG emissions in the province [5]. Thus, this sector is an important lever to achieve the target of reducing Quebec emissions by 37.5% compared to 1990 levels by 2030 [4].

One of the solutions to reduce vehicle emissions is to replace part of the provincial fleet's conventional vehicles (CVs) with electric vehicles. Direct emissions from electric vehicles (EVs) are essentially zero, but the overall emissions related to electricity production can be higher. In the case of Quebec, its electricity was associated with roughly 34.5 gCO₂/kWh in 2017 [8]. To compare, Ontario's electricity in 2008 (at the time, coal plants still functioned [10]) was associated with 201 gCO₂/kWh [9]. Another comparison can be done with the US, whose average gCO₂/kWh in 2019 was 417g [11]. The methods used to calculate these values vary from each other, but they can be used to get an overall idea of the differences between emissions in each region.

Moreover, an EV that consumes 20 kWh/100km (electric vehicles consume between 15 and 30 kWh per 100 km [38]) would emit 6.9 gCO₂/km which would be 25 times less than CVs (assuming 220 gCO₂/km). As such, EVs in Quebec provide the potential to significantly reduce transport-based and overall CO₂ emissions. That said, it is by no means obvious what portion of the provincial fleet would need to convert to EVs to reach provincial emissions targets, or whether this would be feasible from an energy supply standpoint.

As such, this paper calculates the current GHG emissions of the Montreal personal vehicle fleet to form a baseline. The baseline is then used to evaluate different EV-emission scenarios based on varying assumptions of CV to EV conversion to determine how many vehicles would need to change in order to achieve the emissions reduction targets. We focus on the Montreal fleet for two key reasons : 1) it is the largest city in Quebec, with approximately half of its population in 2018 [13]; 2) data required to estimate use is available through its quinquennial Origin-Destination survey along with complementary data.

The next section reviews existing methods to calculate GHG emissions and to analyze changes in vehicle fleets. Then we will present the data used in this research. In the next section we will explain the methodology used to calculate Montreal's personal vehicle fleet emissions in 2018 and to determine how many vehicles would need to change in order to achieve the emissions reduction targets. Afterwards, the results of the analysis will be presented, and the paper will be finished with some discussion of the results and concluding remarks.

4.3 Background

Studies exist that have examined emissions produced by personal travel, while others exist related to EV purchases. Examples of studies that have examined transport emissions related to personal vehicle use include [15–19]. Such papers typically focus on emissions produced by personal daily travel, using different transport modes, and how they vary spatially. However, they do not typically consider electric vehicles, their uptake, and how they might help achieve reduction targets. Although such articles study all available modes, they do so at a lower level of detail than what is necessary to estimate which vehicles would need to change to reach a given emission threshold.

Two main equations emerge from these articles to calculate GHG emissions for a given trip. The first, taken from [18] appears straight-forward (equation 4.1). It requires distance traveled (d), energy efficiency per km (f), a factor to convert kWh to CO₂ emitted (k) and the time that a vehicle has sat still in order to calculate the cold start impacts.

$$GHG = d \times f \times k \quad (4.1)$$

Total GHG emitted is the multiplication of these three terms. However, calculating the energy efficiency per km (f) would require knowing the energy used by all transport modes studied (9 in this case) and the average passenger rates for each.

The second, used by [15, 17, 19] is based on disaggregate data on personal vehicles and an average value for buses (equation 4.2).

$$GHG = \frac{FCR \times SCF \times EF \times D}{NP} \quad (4.2)$$

Total GHGs emitted is the multiplication of the average fuel consumption rate (FCR) of the vehicle used, a speed correction factor (SCF), an emission factor (EF) and the distance of the trip (D). This total is also divided by the number of people in the vehicle during the trip (NP) because the objective is to give an emission value for a given person. The formula can vary across articles. For instance, [15] were able to know which part of the trip was done with a motorized mode and which part wasn't. They replaced the total distance (D) in equation 4.2 with the motorized trip distance during the trip.

Some studies have been carried out to analyze the uptake of electric vehicles in a given area. For example [21, 22] use total cost of ownership (TCO) to predict market changes, but do

not pay much attention to greenhouse gas emissions. [21] studied the link between TCO from the user's point of view and people's choices when buying new vehicles. The authors did not estimate GHG emission changes to a fleet. [22] analyzed some possible scenarios regarding the evolution of the German automobile fleet up to 2030 under specific policies like purchase subsidies. In that study, they only consider vehicle CO₂ emissions to calculate taxes associated with their use according to the different policies.

Other methods to simulate EV and hybrid electric vehicles (HEV) market evolution are reviewed by [23]. That study divided previous work into three groups : agent-based models, consumer choice models, and diffusion rate and time-series models. Agent-based models estimate the travel choices of a population that has to meet given needs under given constraints. Consumer choice models use utility measures and logit models to predict people's choices. Finally, diffusion rate and time-series models predict the evolution of markets in a more macroscopic scale.

Finally, some articles analyze the impacts on CO₂ emissions of changes in vehicle fleets. For instance [24] used multinomial logit models to estimate the market share of different types of vehicles in Austria from 2010 to 2050 and then used results of a life cycle analysis to calculate the associated emissions of each type of vehicle. An article by [25] studied the provinces of Quebec, Ontario and Alberta using the PEV-CIM tool from Natural Resources Canada. They analyzed the potential impacts of a change in fleet composition on GHG emissions at the provincial level. However, both articles take into account a limited number of vehicles, and in the second [25] the assumptions on EV market uptake are made arbitrarily.

[26] forecast trip behaviour in Maryland using a four-step model. They ran simulations with different zero-emission vehicle ownership levels based on the Maryland Department of Transportation projections. However, like both previous articles, this article didn't estimate how many vehicles would need to be replaced in order to achieve a given GHG emission reduction target.

As can be seen in previous paragraphs, GHG emissions and electric vehicle ownership have been the topic of a lot of studies. Some aim to calculate CO₂ emissions in a given area. Others try to predict electric vehicle market evolution. Still others assess the effects on GHG emissions of modifications of vehicle fleets. Nevertheless, estimating how many EVs would be necessary to meet government objectives on reducing GHG emissions doesn't seem to have been studied yet.

The contributions of this article are then :

- calculating as precisely as possible the current emissions of the Montreal fleet of personal vehicles based on all registered personal vehicles and likely distances travelled by municipal sector ;
- calculating the composition of the fleet necessary to achieve Quebec provincial government GHG reduction objectives based on five different fleet evolution scenarios.

4.4 Data used

Three main different datasets were used in the analysis for this report. The 2018 OD survey was used to provide information about the number and length of trips by Montrealers [28]. This survey investigates trips made by 147,200 respondents from 73,400 households to draw a portrait of Montreal mobility. 3.89% of total households answered the survey and this sample represents all 4.4 million people on the 9,840 km² area covered by the survey [29]. A total of 357,800 trips from September 5 to December 20 inclusive were recorded in the database. These are trips made by respondents in the 24-hour period before they answered the survey. However, week-end trips were not recorded. The OD survey is done with a stratified random sample : the 158 municipalities in the area are gathered into 113 municipal sectors, which is the stratum. A municipal sector is a geographic area the size of a small city whose population typically is around 100,000 people, but can vary between 3,000 and 140,000 people.

Among other variables, the survey provides the origin and destination coordinates of the trips made by respondents. The combination of modes used is also available. For example we can know if a person took the bus, then the metro, then was picked up by someone with a car. Sometimes junction coordinates indicate where the person switched between a private mode and public mode of transport. Finally, household expansion factors were available that allow the sample to be expanded to the population, in terms of number of trips per day or modes of transport used for example.

Although the OD survey is very detailed, it does not include the characteristics of household vehicles like their average CO₂ emissions per km. This value has to be averaged at the municipal sector level and was based on the vehicle registration database.

The vehicle registration database for the province is maintained by the Quebec Automobile Insurance Company (SAAQ) [30]. Emission statistics of vehicle models was obtained from Natural Resources Canada [31] and this was used to calculate CO₂ emissions. The first gives the year, make, model, number of cylinders and engine size of each vehicle in the province. The second gives the corresponding CO₂ emissions in grams per km.

We combined these two databases to get the CO₂ emission profile of personal vehicles in

the province. We then gathered vehicles with similar emissions into ten emission categories using a k-means clustering method. Only their CO₂ emission values were taken into account to measure the distance between them. The distance measurement used is the square of the emission difference between vehicles.

A request was made to the provincial licensing authority to obtain a dataset with the number of vehicles in each emission category at the dissemination area level (slightly smaller than the US block group). This data was aggregated to the municipal sector level afterwards. We had to use aggregated values for confidentiality reasons. The number of emission categories was set to 10 to respect data confidentiality, but it could have been higher.

Table 4.1 shows what was obtained at the end of that process. For instance 2317 vehicles belong to emission category 2 in the peripheral city center. Table 4.2 shows the average emissions and the number of vehicles per category.

Tableau 4.1 Overview of the data obtained from the provincial licensing authority

| emission category | ec0 | ec1 | ec2 | ec3 | ec4 |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|
| Montreal : City center | 34 | 175 | 863 | 1169 | 1112 |
| Montreal : peripheral city center | 66 | 347 | 2317 | 2881 | 2600 |
| Montreal : Southwest | 53 | 327 | 4509 | 5418 | 3880 |
| emission category | ec5 | ec6 | ec7 | ec8 | ec9 |
| Montreal : City center | 1180 | 807 | 517 | 160 | 95 |
| Montreal : peripheral city center | 2608 | 1941 | 1276 | 425 | 186 |
| Montreal : Southwest | 3811 | 2954 | 1859 | 683 | 252 |

Tableau 4.2 Emission values and number of vehicles for the 10 emission categories

| Emissions category | ce0 | ce1 | ce2 | ce3 | ce4 |
|----------------------------------|---------|---------|---------|-----------|---------|
| Emissions (gCO ₂ /km) | 6.9 | 47.6 | 170.2 | 190.8 | 210.5 |
| Number of vehicles | 12,576 | 55,843 | 895,852 | 1,036,725 | 691,539 |
| Emissions category | ce5 | ce6 | ce7 | ce8 | ce9 |
| Emissions (gCO ₂ /km) | 234.5 | 263.3 | 291.6 | 331.2 | 375.9 |
| Number of vehicles | 693,929 | 618,897 | 428,870 | 248,867 | 96,092 |

For the second part dedicated to changes in the fleet, additional data was used. Population estimations for Montreal were taken from two sources. The first is the population census for

Montreal [40]. It provides population estimates every 4 years from 1996 to 2016. It is the only one which provides data for the year 1990. This is why it was used to calculate 1990 CO₂ emissions. The other source is Quebec’s provincial institute of statistics (ISQ) [13]. Data from the ISQ is available at the municipal level for every year between 2011 and 2018, thus it was used for the vehicle ownership growth calculations.

To estimate 1990 emissions, population data for the province was taken from annual demographic estimates by Statistics Canada [41]. We also used emission values for the province by [39].

To create the hypothetical fleet, we used vehicle data from the SAAQ [30] for the years 2011 to 2018. Population growth forecasts for 2030 were obtained from reference scenario values by the ISQ [44].

4.5 Methodology

Methodologically, this research is divided into two parts : estimation of personal vehicle fleet CO₂ emissions in 2018 for Montreal and the calculation of the changes in the fleet necessary to meet the provincial CO₂ emission reduction target. Once we discuss these, we will then discuss what this implies for the ability to meet emission targets through the electrification of the private vehicle fleet.

4.5.1 Estimation of 2018 emissions

To calculate Montreal’s personal vehicle fleet CO₂ emissions in 2018, the equation used by [15, 17, 19] was applied. In this case, equation 4.3 was used.

$$GHG_{2018} = \sum_p \sum_{t_p} \frac{D_{pv} \times EF_{veh}}{NP} \quad (4.3)$$

In this equation, p is the number of people in Montreal, t_p the number of trips made by person p in 2018, D_{pv} the distance traveled using a private vehicle during the trip, EF_{veh} the emission factor in gCO₂/km of the vehicle used for the trip, and NP the number of people in the vehicle. It should be noted that the fuel consumption rate, the speed correction factor, and the emission factor from equation 4.2 were combined into the emission factor in eq. 4.3.

Disaggregate data from the OD survey was aggregated to the municipal sector level, and represents the travel behavior for an average fall day. Therefore, equation 4.3 has to be

modified to be used with the available data. The equation used given this constraint is presented in equation 4.4.

$$GHG_{2018} = \sum_{p_{OD}} \sum_{t_{p_{OD}}} \frac{D_{pv} \times EF_{veh_{MS}}}{NP} \times f_{exp_{OD}} \times f_{exp_{annu}} \quad (4.4)$$

Here, we sum across the trips made by the expanded respondents (p_{OD}). The emission factor is now average CO₂ emissions per km for all vehicles in the municipal sector MS where the respondent lives ($EF_{veh_{MS}}$). It was obtained using table 4.1. Two new terms are added in the equation. The first accounts for the household expansion factor ($f_{exp_{OD}}$) and the other is a factor to annualize the results ($f_{exp_{annu}}$). Given that the initial calculations are based on those of an average fall day, the value of 335 was chosen for this last term following research on how to annualize the values from an OD survey in Montreal [34].

Finally, since the number of people in the vehicle was not always reported, such missing values were replaced by the average value calculated using trips for which the number of passengers was given. This assumes that the number of people in cars doesn't vary spatially, and that the time and purpose of the trip do not have any influence on it. Studying the link between these factors and the number of people in cars would have made the calculation more precise.

It can be further noted that the time of the trips was not taken into account. This implies that vehicles emit as much during peak hour than during the other time of the day. Taking time of day into account would therefore increase precision.

Distance Calculations

To calculate the distance of automobile trips we estimated the shortest path between the origin, destination and the given junctions of the trip using the OSRM API [32]. As this route calculation server only works for trips within Canada, the distance of trips whose origin or destination was outside of Canada (0.5% of the total number of trips) was calculated with the HERE API [33].

Since the purpose of the study was to examine only how the vehicle fleet would need to change if reductions were made with private electric vehicles, not all modes were retained. Only trips where one part was car-driver, car-passenger, taxi or motorbike modes were used. Those using metro, bike, plane, train or interurban bus modes were not used in the calculation. Some requests to the two APIs returned strange values. For example the distance between origin given and origin returned (or destination given and destination returned) by the requests

were more than 5 km. We chose to ignore these 2,902 trips as most of them had one of their coordinates equal to zero. Among these trips, only two had coherent X, Y values, but they didn't seem to use the road network.

Average Emissions by Municipal Sector

As we explained in section 4.4, vehicles from the original database of the provincial vehicle licensing authority (SAAQ) [30] were sorted into 10 categories of emissions. One category was dedicated to EVs. Emissions for all other vehicle types in a given emission category represented the average emissions of all vehicles in the group. Electric vehicles were assumed to emit 6.9 gCO₂/km. This value is the estimation made in section 4.2 of the CO₂ emitted during the production of electricity needed to power the vehicle in Quebec.

The average emissions of vehicles from a given municipal sector were calculated using equation 4.5.

$$EF_{veh_{MS}} = \sum_g \frac{n_g \times EF_g}{n_{tot}} \quad (4.5)$$

In this equation, g is the vehicle emission group, n_g the number of vehicles in this group in the municipal sector, n_{tot} the total number of vehicles in the municipal sector and EF_g the emission factor whose calculation was explained in the previous paragraph.

4.5.2 Changes in the fleet

To calculate the changes in the fleet needed to achieve provincial goals, 1990 emissions of the Montreal fleet had to be estimated since the reduction target is based on the 1990 base-year. Then, an estimate of the most likely composition of the 2030 fleet had to be made. Finally, to estimate emissions when including the conversion of parts of the fleet to electric vehicles, several potential conversion pathways (essentially hypotheses on which vehicles would be converted to electric vehicles) had to be developed.

Estimation of 1990 emissions

A different approach was necessary to calculate the Montreal private vehicle fleet emissions in 1990 (the baseyear for the provincial government GHG targets). Data was only available about the emissions of cars for the whole province in 1990 [39], along with the population of the Montreal census metropolitan area [40] and the total population of the province [41]. Comparable data was also available for the year 2018.

In order to come up with comparable emissions between 1990 and 2018, we used the following approach. We assumed that the difference in emissions per person between Montrealers and the rest of the province has remained constant over time. This was the most appropriate approach given the available data, and knowing that previous research found that people in more densely-populated areas drive less and emit less than others [18, 19].

$$\frac{Em_y}{Pm_y} = \alpha \times \frac{Eq_y - Em_y}{Pq_y - Pm_y} \quad (4.6)$$

In equation 4.6, the emissions (E) of Montreal (m) over its population (P) for a given year (y) equals a constant (α) times the emissions of the rest of the province (the difference between the emissions of the province of Quebec (q) and the emissions of Montreal (m)) over the population. With this equation, α could be calculated using 2018 values for the province's and Montreal's population, as well as emissions for the province. Montreal's 2018 emissions come from the results of the first step of this research described in section 4.5.1.

From equation 4.6, CO₂ emissions of the personal vehicle fleet in Montreal in 1990 were approximated by equation 4.7.

$$Em_{1990} = \frac{\alpha \times Eq_{1990} \times Pm_{1990}}{(Pq_{1990} - Pm_{1990}) + \alpha \times Pm_{1990}} \quad (4.7)$$

This method assumes that Montrealers' emissions varied at the same rate as the emissions by other people of the province. Further, socio-demographics were not analyzed. Taking this into account could have modified the results.

Creation of the hypothetical 2030 fleet

Before calculating the number of vehicles that need to be replaced in order for the provincial GHG emission target to be reached, the composition and size of the 2030 private vehicle fleet for each municipal sector needed to be created. Previous studies have tried to forecast vehicle ownership, for example with discrete choice models [42]. The article by [43] focused on the type of vehicle used by households, at a fine geographical scale. Since our study focused on vehicle type and distances travelled on the municipal sector level, we first used population forecasts by Quebec's provincial statistics institute (the ISQ) [44] to predict the population of the entire area covered by the OD survey in 2030.

We then tried the two methods illustrated in Figure 4.1 to estimate how many vehicles would make up the fleet in 2030. The first was a naive solution : multiply the number of all vehicles of each category of each municipal sector by the rate of population increase. In other words

this method assumes that all new vehicles from 2018 to 2030 will be sorted in to the 10 emission categories according to the 2018 distribution. This is a very strong assumption as it involves an increase in the number of the most emitting vehicle categories even though these categories are largely made up of old vehicles, which will be retired by 2030. However, the method is quick and easy to implement.

For the second method, we first used the population predictions for 2030. We then estimated vehicle ownership using these predictions and both vehicle [30] and population [13] data from 2011 to 2018 that allowed for a trend to be estimated. Next, we estimated the proportions of the 10 vehicle categories with the same method. Linear regression was used to predict the 2030 values. Finally we allocated vehicles to municipal sectors according to their 2018 ratios.

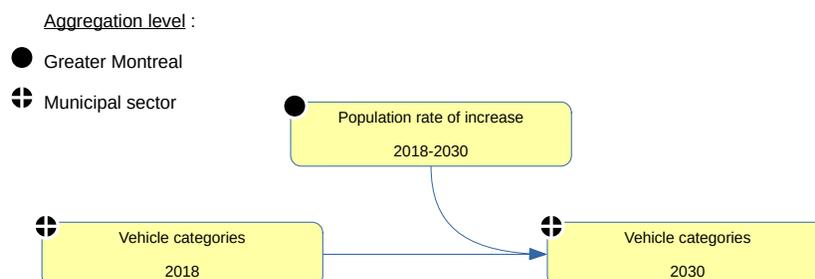
Calculation of the changes needed in the fleet

Starting from table 4.1 depicting the 2030 fleet, some vehicles were replaced from categories 1 to 9 with electric ones (group 0) following different rules until the GHG emissions of the entire fleet fell below the targeted threshold. The rules are as follows :

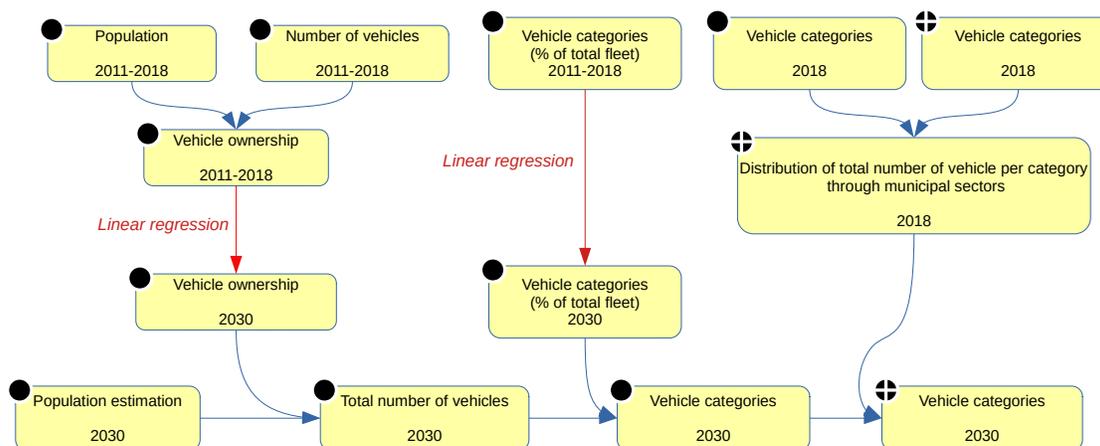
- 1st scenario (Random) : Replace vehicles randomly
- 2nd scenario (Efficient) : Replace vehicles that have the highest emissions per km first (i.e., the least efficient motors and the biggest vehicles)
- 3rd scenario (Optimistic) : Replace vehicles that emit the most during a year (both emissions per km and veh.km travelled in municipal sectors are taken into account)
- 4th scenario (Inefficient) : Replace vehicles that have the lowest emissions per km first
- 5th scenario (Pessimistic) : Replace vehicles that emit the least during a year

The first scenario, *Random*, could be interpreted as resulting from electric vehicles purchase incentives without targeting specific vehicles. The second, *Efficient*, could be interpreted as incentives targeting vehicles which emit the most per km. The third, *Optimistic*, can be seen as focusing on both the use and the efficiency of the vehicle. The second to last, *Inefficient*, relates to people who already seek out energy-efficient vehicles, replacing their vehicles with EVs. The last one, *Pessimistic*, is the situation where perhaps environmentally concerned individuals who already own efficient vehicles and do not use them frequently are the people that replace their vehicles.

An estimation of veh.km travelled is needed to estimate the emissions linked to a specific scenario. We assumed that the kilometers travelled per vehicle within a given municipal sector did not change from 2018 to 2030. In other words, travel behaviour did not change. This was felt to be reasonable as vehicle kilometers travelled seem to have been relatively stable in Canada for the past two decades [45]. However, the increase in the the fleet size would



(a) first method (naive)



(b) second method

Figure 4.1 Creation of the hypothetical 2030 fleet using two methods

consequently increase veh.km travelled, and conversely, changing modes from personal vehicle to public transport or active modes would generally decrease veh.km travelled. Studying the evolution of travel behaviour would have allowed us to better estimate veh.km travelled in

2030.

4.6 Results

4.6.1 2018 emissions

We will now present the results. We begin with Montreal’s personal vehicle fleet 2018 emissions. Then the five scenarios on the replacement of conventional with electric vehicles will be presented.

In 2018 there were 2.3 million vehicles in the OD region of Greater Montreal, and their division between emission categories is given in figure 4.2.

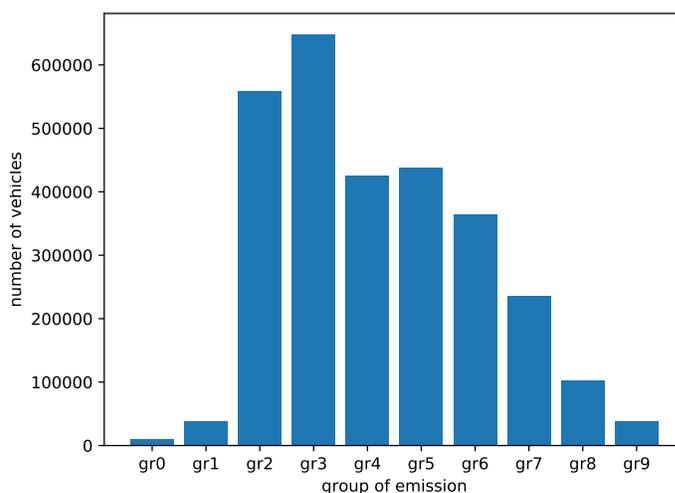


Figure 4.2 Vehicle emission categories in the 2018 Montreal fleet

Category 0 represents electric vehicles, whose emissions are set to $6.9 \text{ gCO}_2/\text{km}$, while category 1 is largely made of hybrid electric vehicles, whose emissions values were averaged at $47.6 \text{ gCO}_2/\text{km}$ based on dataset described in section 4.4. The other categories contain only conventional vehicles whose emission values vary from $170.2 \text{ gCO}_2/\text{km}$ (category 2) to $375.9 \text{ gCO}_2/\text{km}$ (category 9).

Figure 4.3 represents average emissions per veh.km by municipal sector : people in the suburbs generally use vehicles that emit more. However, areas with high average emissions per km can be seen around the center of the island too.

Figure 4.4 shows average km traveled per vehicle and CO_2 emitted per vehicle in municipal sectors : people from suburban areas use their car more, and given that their vehicles emit

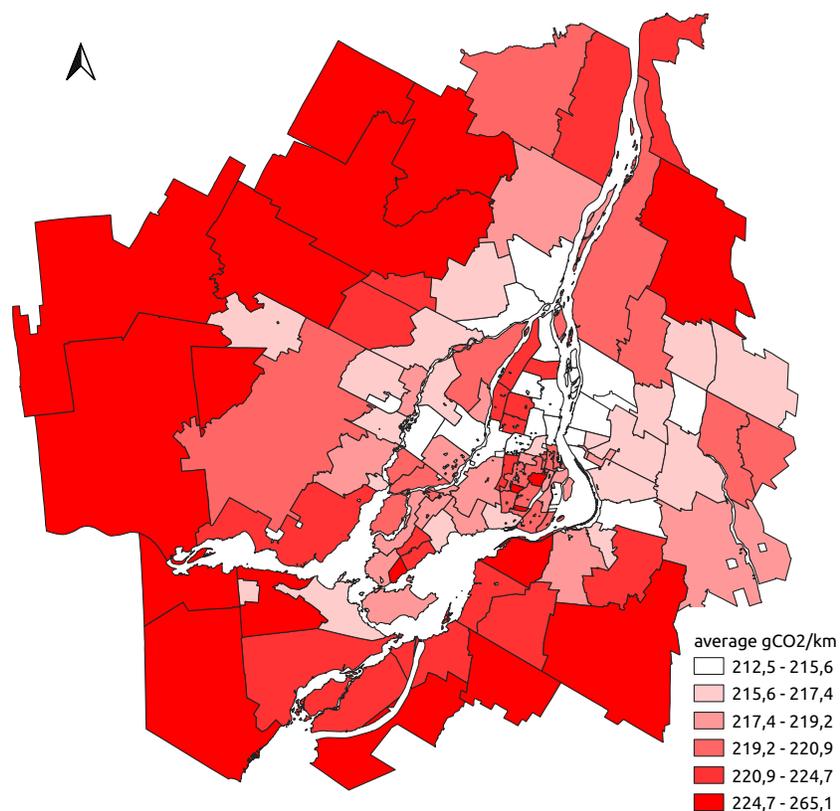


Figure 4.3 Average CO₂ emissions per km in Greater Montreal in 2018

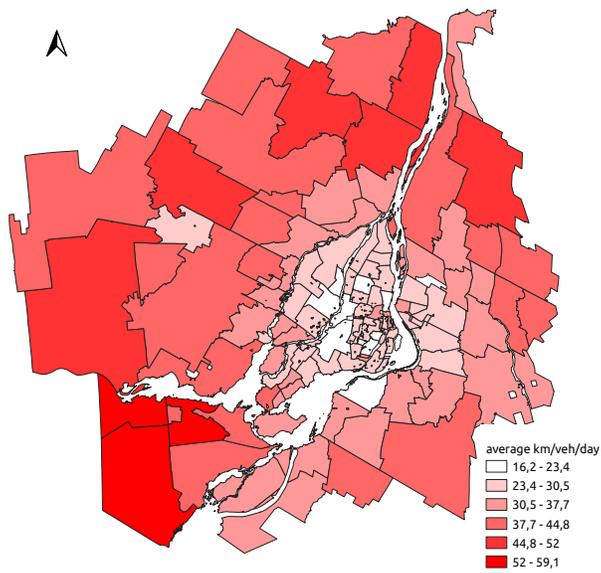
more per km, the total emissions per vehicle are the highest in the region.

Table 4.3 shows key values concerning CO₂ emissions and km traveled by Montrealers in 2018. Note that gCO₂/km is the average emission factor of vehicles by municipal sector. Montreal's personal vehicle fleet emitted in total 5.52 MtCO₂ in 2018. That represents 2.35 tCO₂ per vehicle and 1.28 tCO₂ per person. It should be noted that tCO₂ per person only includes people aged 5 years or over, because the youngest are not counted in the OD survey.

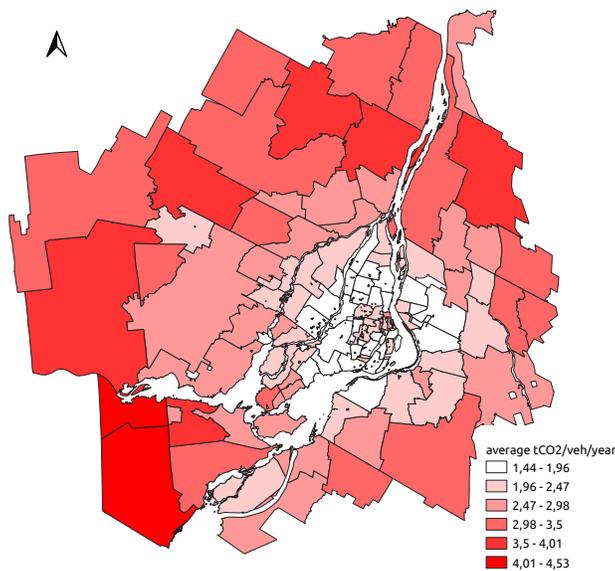
4.6.2 Number of Conventional Vehicles to be Replaced

1990 emissions were estimated to be 3.7 MtCO₂. That means emissions would have to be lower than 2.31 MtCO₂ in 2030 to achieve provincial objective (reduction of 37.5%). As such, Montreal 2018 emissions estimated here (5.52 tonnes) would have to be reduced by 58.2%.

Before calculating the number of vehicles which need to be replaced in order to reach the emission target, different methods for estimating Montreal's 2030 fleet were used. Changes



(a) km traveled in Greater Montreal in 2018



(b) emissions per vehicle per year

Figure 4.4 Km per day and annual emissions per vehicle in Greater Montreal in 2018

include the number of total vehicles in the fleet and the distribution of vehicles among the emission categories. The first method (naive solution) resulted in the same composition of the fleet but with 2.6 million vehicles in total due to population growth. The composition of the fleet using the second method is given in figure 4.5. The number of vehicles with this

Tableau 4.3 Overview of results per municipal sector

| | gCO ₂ /km | km/pers/day | km/veh/day |
|------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|
| mean | 220,4 | 20,1 | 33,0 |
| std | 6,4 | 8,5 | 8,4 |
| min | 212,5 | 6,6 | 16,2 |
| 25% | 216,8 | 13,3 | 26,3 |
| 50% | 219,2 | 20,2 | 32,1 |
| 75% | 222,7 | 25,5 | 38,0 |
| max | 265,1 | 44,2 | 59,1 |
| | tCO ₂ /pers/yr | tCO ₂ /veh/yr | tCO ₂ /MS/yr |
| mean | 1,5 | 2,4 | 48882,6 |
| std | 0,7 | 0,7 | 30813,9 |
| min | 0,5 | 1,4 | 2742,3 |
| 25% | 1 | 1,9 | 25604,7 |
| 50% | 1,5 | 2,4 | 45038,9 |
| 75% | 1,9 | 2,8 | 67982,9 |
| max | 3,4 | 4,5 | 155356,8 |

method increased to 2.9 million due to both population and vehicle ownership growth. We can see that there would be more vehicles in categories 2 and 3 in 2030 than in 2018 with the second method. Emissions per km in these categories vary from 108 gCO₂/km to 200 gCO₂/km.

Table 4.4 shows the result of all replacement simulations on both 2030 fleets described in the previous paragraph, in terms of number of vehicles and in percentage of the total fleet. It can be noted that randomly changing vehicles would require the replacement of nearly two thirds of the fleet by EVs, and only the most optimistic scenario (replacing highest total CO₂ emitting vehicles first) results in less than half of the fleet being replaced by EVs. We see that the replacement of more than 100,000 vehicles could be avoided by focusing on total emissions rather than just on emissions per km. Finally, the difference in the number of vehicles changed between the best and the worst scenarios reaches 687,000 vehicles (23% of total vehicles). It can also be seen that the results do not vary much (<4%) between methods used to estimate the composition of the fleet.

Note on electricity supply

In the hypothetical fleet used for the scenarios described in the previous section, around 40,000 vehicles were electric, while there were only 7,870 EVs in 2018. The scenario requiring

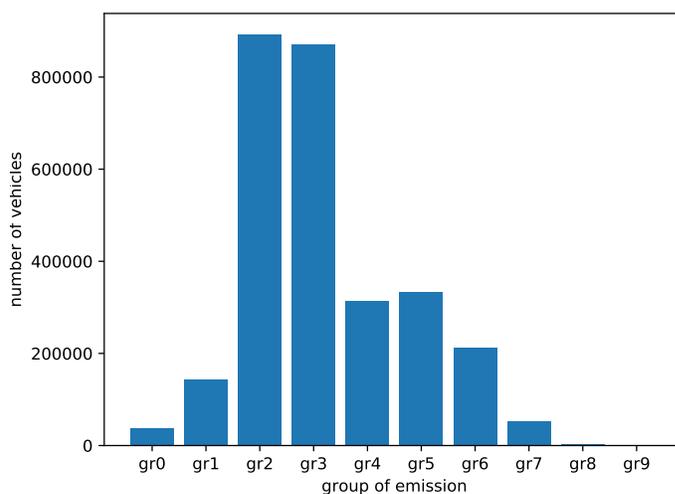


Figure 4.5 Estimated fleet composition according to vehicle emission category in Montreal in 2030

Tableau 4.4 Number of vehicles which need to be replaced in order to reach the emission target

| | Million vehicles changed | Percentage of the 2030 Montreal fleet |
|------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| S1 : random | 1.762 | 61.5% |
| | naive : 1.652 | naive : 63.8% |
| S2 : efficient | 1.531 | 53.5% |
| | naive : 1.417 | naive : 54.7% |
| S3 : optimistic | 1.395 | 48.8% |
| | naive : 1.315 | naive : 50.8% |
| S4 : inefficient | 1.972 | 68.9% |
| | naive : 1.879 | naive : 72.6% |
| S5 : pessimistic | 2.082 | 72.7% |
| | naive : 1.960 | naive : 75.7% |

the replacement of the largest number of vehicles (replacing lowest total CO₂ emitting vehicles first) forecasts requiring 2 million new EVs in 2030, added to the 40,000 already in the fleet. Naturally, the number of vehicles provides an estimate of overall electricity that would be required to power the vehicles in 2030. In addition to demand, its useful to compare such demand with the amount of electricity potentially available in the province in 2030.

The 2 million vehicles of the pessimistic replacement scenario, traveling the average distance

calculated in this research (33 km/day equivalent to 11,000 km/year), and consuming 20 KWh per 100 km, would consume 4.4 TWh a year. This is equivalent to the electricity consumption of 237,600 households (using the equivalence from [48]). This same report states that current electricity production capacity exceeds the provincial needs by more than 40 Twh. As such it is amply sufficient to provide electricity for a 2030 fleet that could meet provincial personal vehicle emission targets. However, it is harder to predict the impact of recharging batteries on electricity demand during peak hours.

4.7 Discussion

This study first showed that instead of decreasing, overall CO₂ emissions of the Montreal fleet increased by 49% from 1990 to 2018. The 2018 Montreal fleet is also characterized by a low number of low-emission vehicles. In fact, vehicles from groups 0 and 1 account for only 1.7% of the current fleet.

Results at the municipal sector scale show that people from suburban areas not only travel more than others, but also have vehicles with higher emissions per km. Therefore, total emissions vary from around 0.5 tCO₂ per person per year (1.4 kgCO₂ per day) in some municipal sectors on the island of Montreal to more than 3 tCO₂ per person per year (8.5 kgCO₂ per day) in the most emitting suburban areas. These values are a bit higher than the values calculated by [18] for Osaka, which vary from 0.12 tCO₂ per person per year in "older single households" living in highly commercial areas to 1.13 tCO₂ per person per year in "all adult households" living in rural areas. On the contrary, they are lower than the values calculated by [19] for Quebec, which vary from 4.3 kgCO₂ per person per day in the city center to 9.7 kgCO₂ per person per day in peripheral areas.

However, differences in vehicle average emissions per km between municipal sectors are not so large. This might be due to the aggregation level. A more disaggregated study would be more precise and would better find areas where emission reduction solutions should be focused. Such an approach was not possible in this study because the population was sampled at the municipal sector level for the OD survey. Therefore data was not reliable if studied at the dissemination area level.

We estimated that vehicles studied in this paper travelled around 11,000 km in 2018. It is less than the value from the 2007 annual Canadian vehicle survey [49]. That survey estimated that the average Canadian vehicle travelled 15,797 km per year. At this date this was the lowest annual value. It is possible that the value calculated in this study is lower because it focuses on an urban area with some of the highest public transport use in Canada [50].

Unfortunately, average distances are not estimated by Statistics Canada since 2009.

Between the two methods used to estimate the 2030 fleet, the composition of the 2030 fleet is quite different. Following the trends from previous years would result in a clustering of vehicles in categories 2 and 3 whose emissions per km vary from 108 gCO₂/km to 200 gCO₂/km. There would also be more vehicles in groups 0 and 1 which emit the least. Despite these differences, the numbers and proportions of vehicles to be changed in the first fleet (naive method) are not so far from the second. In fact, the fleet resulting from vehicle replacement is really different from the initial 2030 fleet for both methods : 50% of vehicles have to be replaced with the most optimistic scenario. Therefore the composition of the fleet we work on does not seem to be that important. If the emission threshold was not this low, differences in results between the two methods would have been probably more visible. Therefore, it might not be so unrealistic to approximate the 2030 fleet by assuming the distribution of vehicles in emission categories is the same in 2030 than in 2018 in this study, as it was done with the naive method.

The gap in the number of vehicles that have to be replaced by electric ones between the best and the worst scenario is not negligible. It means the impacts of two distinct policy choices could have significantly different repercussions. At the same time, the difference is higher between the random replacement and the replacement on the emission per km basis than between emission per km and the total emissions basis. Targeted vehicle replacements seems more important than the choice of the method used to replace vehicles.

We must not forget that 1990 emission levels were estimated using, among others, 2018 emissions that have been calculated in this paper. That means we cannot explain the difference in emission values with territorial considerations, or with specific data about Montreal.

A study such as this done at the provincial level might provide us with much more information, but it is more difficult to estimate the emissions compared to those of big cities where origin-destination surveys are available. The results could also be more precise if data was available in a more disaggregated scale such as the dissemination area. These observations may provide perspectives for future research in this area.

This research also only focused on one parameter to reduce emissions : the number of electric vehicles in the fleet. Changing the km travelled per vehicle or the mode used would have influenced the results.

Furthermore, the geographical area studied and the time can influence the results through carbon intensity of power generation. For example, if this study was carried out in Ontario in 2008, electric vehicles would have indirectly emitted almost 6 times more than in Montreal [8,9]. If it was carried out in the United States of America, EVs would have indirectly emitted 12 times more (electricity carbon intensity is around 417 gCO₂/kWh in this country [11]).

It can be further noted that only tailpipe GHG emissions were taken into account in the study (plus the emissions linked to electricity production). If this study were carried out with a life cycle assessment approach, it would provide us with a more accurate overall insight on the global climate impacts linked with such change in vehicle technology within the fleet, rather than simply meeting local reduction targets.

Finally, we assumed that all economic sectors must reduce their emissions at the same rate, thus we tried to decrease Montreal's vehicle emissions by 37.5% from 1990 levels. However, this assumption does not need to be true, because it is a general objective which considers the whole economic activity of the province. For instance it could be possible to try to further reduce emissions from the transport sector to prevent other sectors from being too impacted; or vice-versa if the transport sector is too slow to adapt, other sectors may make larger reductions.

4.8 Conclusion

This paper explored the possible evolution of CO₂ emissions by personal vehicles in Montreal by focusing on electric vehicle ownership. Current emissions have been estimated at 5.52 MtCO₂ in 2018 which represents a growth from an estimated 3.7 MtCO₂ in 1990. To reach the 37.5% decrease from 1990 levels by 2030, the Montreal's personal vehicle fleet has to reduce its 2018 transport emissions by 58.2%. The 2018 fleet included only 1.7% of low emission vehicles, and in this fleet, the most GHG emitters are located in the suburban areas of the Montreal region.

Choices on how to replace vehicles with electric ones can have a great impact on the number of vehicles which have to be replaced. For instance, the most pessimistic scenario would require the replacement of 2 million vehicles. That would represent 72.7 % of the fleet. In contrast, the most optimistic scenario would still require the replacement of 1.4 million vehicles.

The results of this study could be improved if the research was carried out at a more disaggregated scale. The enlargement of the area of study to the whole province could also provide

more interesting data, but emissions would be probably more difficult to estimate. Finally, a life cycle assessment approach would enable to have a better overall insight on climate impacts.

4.9 Author contribution statement

The authors confirm contribution to the paper as follows : study conception and design : Owen Waygood, Zachary Patterson and Pierre Laffont ; data collection : Laffont ; analysis and interpretation of results : Laffont, Patterson, Waygood ; draft manuscript preparation : Laffont. All authors reviewed the results, edited and approved the final version of the manuscript.

CHAPITRE 5 RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES

Ce chapitre décrit des résultats qui n'ont pas été abordés dans l'article. Premièrement, les résultats concernant l'évolution de la flotte en suivant les tendances actuelles seront donnés. Ensuite, certains calculs ont été refaits en modifiant des facteurs comme l'émission des VE ou encore le facteur d'annualisation dans le calcul des émissions de 2018 pour mesurer la sensibilité des résultats par rapport à ces données.

5.1 Modélisation de la proportion de véhicules électriques dans la flotte mont-réalaise jusqu'en 2030 selon les tendances actuelles

Cette section décrit et commente les résultats des calculs du nombre de VE dans les flottes de 2030 pour Montréal et pour la province en suivant les tendances des ventes des dernières années.

5.1.1 résultats

Le tableau 5.1 montre les résultats des simulations sans fixer le potentiel de marché. Toutes les simulations prédisent un nombre de VE sur les routes en 2030 bien supérieur aux prévisions de population pour ces années. Le modèle de Gompertz prédit aussi un potentiel de marché largement supérieur à celui des autres modèles, qui semble totalement irréaliste. Ces résultats sont bien sûr théoriques.

Tableau 5.1 Potentiel de marché et nombre de VE sans marché potentiel fixé d'avance

| | Méthode | Nb de VE en 2030 (en million) | Potentiel de marché |
|----------|----------|-------------------------------|---------------------|
| Province | Bass | 21,2 | 12 milliards |
| | Gompertz | 21,5 | 7×10^{73} |
| | Logistic | 12,3 | 20 millions |
| Montréal | Bass | 11,0 | 1,8 milliards |
| | Gompertz | 11,8 | 2×10^{164} |
| | Logistic | 12,9 | 2,4 milliards |

La figure 5.1 montre les résultats des simulations par année pour Montréal. Il peut être noté que d'après l'allure des courbes, seulement les "innovateurs" et "adopteurs précoces" posséderaient un véhicule électrique en 2030.

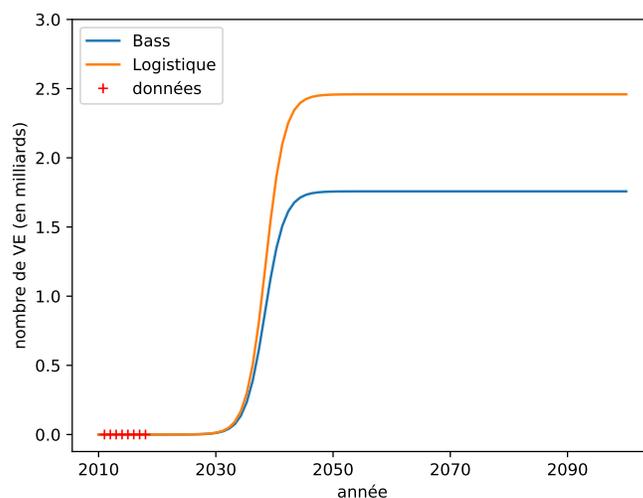


Figure 5.1 Nombre de VE dans la flotte de Montréal selon les modèles de Bass et Logistique

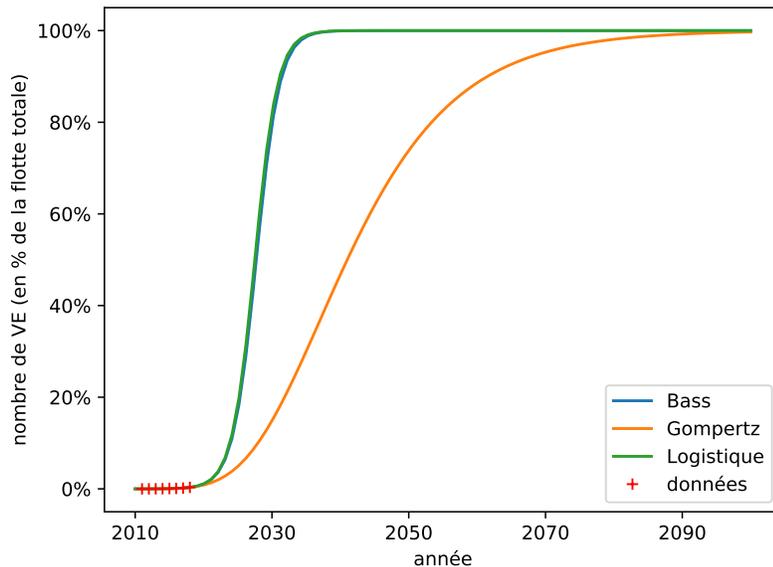
Le tableau 5.2 montre le résultat des simulations en faisant l’hypothèse que le potentiel de marché est égal à la flotte totale. Selon les résultats de la méthode de Gompertz, les VE représenteraient 25% de la flotte de la province et 14,9% de la flotte de Montréal, alors que les deux autres méthodes prédisent que la flotte serait électrifiée à environ 80% pour les deux jeux de données.

Tableau 5.2 Nombre de VE et pourcentage de la flotte totale avec un potentiel de marché fixé

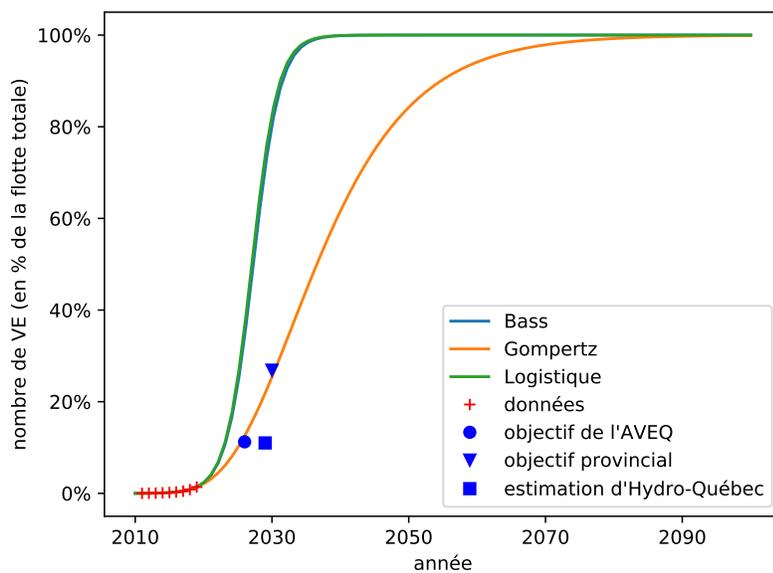
| | Méthode | Nb de VE en 2030 (en million) | pourcentage de la flotte |
|----------|----------|-------------------------------|--------------------------|
| Province | Bass | 4,29 | 80,3% |
| | Gompertz | 1,36 | 25,4% |
| | Logistic | 4,42 | 82,7% |
| Montréal | Bass | 2,30 | 79,4% |
| | Gompertz | 0,43 | 14,9% |
| | Logistic | 2,38 | 82,1% |

La figure 5.2 montre l’évolution de la flotte à Montréal et au Québec, avec l’hypothèse que toute la flotte sera électrifiée au final.

Trois valeurs ont été ajoutées à la figure 5.2b. La première est l’objectif de l’AVEQ pour 2026. L’association souhaite voir 600 000 VE sur les routes québécoises le 31 décembre de cette année-ci [46]. La seconde est l’objectif du gouvernement [51] : 1,5 millions de VE en 2030.



(a) Montréal



(b) Province de Québec

Figure 5.2 Proportion des VE dans la flotte

La dernière valeur est l'estimation faite par Hydro-Québec dans son rapport [48] dans lequel la compagnie souhaite prévoir la future demande énergétique de la province. Elle prévoit

que 11% de la flotte sera composée de VE en 2029. Cela demanderait selon eux 2,3 TWh supplémentaires de production d'électricité annuelle.

5.1.2 Discussion

Les données actuelles sur les VE déjà présents sur les routes ne semblent pas prédire le potentiel de marché de manière efficace. Ainsi, la méthode logistique appliquée à la flotte de la province, qui semble donner le résultat le plus vraisemblable, indique un potentiel de marché plus de quatre fois supérieur à la flotte totale de 2018. Les données utilisées s'étendent de 2011 à 2018, le manque de données historiques des ventes est probablement une des raisons principales de cette imprécision.

Ces résultats suggèrent donc que ce genre de données ne devrait donc pas être utilisé avec ces modèles sans fixer un potentiel de marché. De plus, les données actuelles décrivent seulement la partie des ventes correspondant aux adopteurs précoces, cela peut questionner la capacité du modèle à prédire les comportements de la majorité tardive et des retardataires. En fixant le potentiel de marché à la flotte totale, les modèles Logistique et de Bass semblent surestimer les ventes à venir. Dans le cas contraire, les objectifs provinciaux de 2030 pourraient être revus à la hausse, car le gouvernement envisage une flotte électrifiée à seulement environ 25% en 2030, contre plus de 80% pour les deux modèles cités. Au niveau provincial, le modèle de Gompertz coïncide assez bien avec les objectifs provinciaux et de l'AVEQ. Il semble que ce modèle soit le plus adapté. Ces résultats pourraient aussi laisser penser que l'AVEQ et le gouvernement aient utilisé ce genre de modèle pour fixer leurs projections. Cependant, il ne prédit que 430 000 VE dans la flotte montréalaise en 2030. C'est clairement insuffisant pour atteindre la cible de réduction des émissions de CO₂. À l'inverse, les modèles Logistique et de Bass prédisent un nombre de VE suffisant dans cette flotte pour atteindre cette cible, même avec le pire scénario de remplacement dont les résultats sont donnés en section 4.6.2.

Pour résumer, prédire un nombre de VE suffisant dans la flotte montréalaise pour réduire de 37,5% les émissions de GES par rapport aux niveaux de 1990 n'est possible qu'avec les modèles qui semblent surestimer les ventes à venir dans la province. Au contraire, le modèle qui coïncide avec les prévisions au niveau provincial ne prévoit pas un nombre de VE suffisant pour la flotte de Montréal en 2030.

Les prédictions d'Hydro-Québec sont les moins élevées. Cette valeur devrait peut-être être estimée de nouveau, car elle semble assez basse comparée aux trois modèles et aux estimations des autres acteurs.

On pourrait aussi comparer ces résultats à l'âge moyen de la flotte, qui peut donner un ordre d'idée sur le nombre d'années à attendre avant qu'un propriétaire décide de changer de véhicule. Cet âge moyen est estimé à 9,71 ans pour la flotte canadienne selon [52], et les

données de la SAAQ utilisées dans cette étude permettent de calculer un âge moyen de 8 ans environ. Ainsi, pour que les prédictions des modèles Logistique et de Bass soient suivies, il faudrait que les nouveaux véhicules achetés soient en grande majorité électriques dès 2022 pour obtenir un taux de véhicules électriques de 80% sur les routes tout en respectant les données d'âge moyen de la flotte. Le plan pour une économie verte [51] a fixé de son côté pour objectif que les ventes de véhicules zéro émission atteignent 100% du marché en 2035.

5.2 Variation des résultats avec différents facteurs d'annualisation

Cette section analyse l'effet de l'utilisation de certains facteurs d'annualisation dans le calcul des émissions de GES des véhicules particuliers du Grand Montréal en 2018 et dans les répercussions sur le nombre de véhicules à remplacer par des VE en 2030. Ces facteurs servent à passer des émissions de la flotte montréalaise pendant un jour moyen d'automne aux émissions durant une année entière.

Le tableau 5.3 montre les variations dans les résultats pour les facteurs d'annualisation de 290 et de 250 évoqués en section 3.1.2. La valeur de 290 a été calculée selon des comptages dans les transports en commun par [35] et 250 correspond au nombre de jours de travail dans une année. La valeur de 335 est celle qui a été utilisée dans cette étude.

Tableau 5.3 Sensibilité des résultats par rapport au facteur d'annualisation

| Facteur d'annualisation utilisé | 335 | 290 | 250 |
|---|-------|-------|-------|
| Variation | | -13% | -25% |
| Emissions à Montréal en 2018 (en Mtonnes) | 5,52 | 4,78 | 4,12 |
| Variation | | -13% | -25% |
| Proportion de véhicules remplacés aléatoirement | 61,5% | 61,9% | 62,2% |
| Variation | | +0,7% | +1,1% |
| Proportion de véhicules remplacés selon le scénario optimiste | 48,8% | 49,2% | 49,5% |
| Variation | | +0,8% | +1,4% |

Ces résultats montrent que les émissions annuelles sont directement proportionnelles au facteur utilisé. En effet, les émissions de chaque déplacement sont multipliées par ce facteur pour arriver à une valeur annuelle. Une variation différente aurait pu être relevée si les facteurs d'annualisation variaient spatialement, pour mieux rendre compte des différences de comportements entre les habitants du centre-ville et de la périphérie.

Aussi, plus le facteur utilisé est bas, plus le nombre de véhicules à remplacer augmente. On remarque cependant que le nombre de véhicules à remplacer par des VE pour atteindre les objectifs québécois varie très peu en comparaison à la variation de la valeur du facteur utilisé.

Ainsi, le choix du facteur d'annualisation a une importance majeure sur les émissions de CO₂ de 2018, mais n'a que très peu d'influence sur le nombre de VC à remplacer par des VE suivant notre méthodologie, qui reste élevé quel que soit le facteur utilisé.

5.3 Variation des résultats avec différentes valeurs d'émission pour les véhicules électriques

Cette section, elle, analyse l'effet de l'utilisation de différentes valeurs d'émission des VE dans le calcul des émissions de GES des véhicules particuliers du Grand Montréal en 2018 et dans les répercussions sur le nombre de véhicules à remplacer par des VE en 2030. La valeur d'émission utilisée dans cette étude est 6,9 gCO₂/km. Elle correspond au modèle S de la marque Tesla, qui consomme environ 20 kWh/100km [38]. Cependant, tous les modèles électriques ne consomment pas la même quantité d'électricité pour se déplacer. Par exemple, la Hyundai IONIQ consomme environ 15 kWh/100km et la Jaguar i-Pace consomme environ 27 kWh/100km [38].

Le tableau 5.4 montre donc les variations dans les résultats pour des valeurs d'émission associées à un véhicule consommant 30 kWh/100km (10,35 gCO₂/km) et un consommant 15 kWh/100km (5,175 gCO₂/km), par comparaison à un véhicule consommant 20 kWh/100km (6,9 gCO₂/km).

Tableau 5.4 Sensibilité des résultats par rapport à la valeur d'émission des VE

| Valeur d'émission des VE (en gCO ₂ /km) Variation | 6,9 | 10,35 | 5,175 |
|--|-------|-------|-------|
| | | +50% | -25% |
| Emissions à Montréal en 2018 (en Mtonnes) Variation | 5,52 | 5,52 | 5,52 |
| | | +0% | +0% |
| Proportion de véhicules remplacés aléatoirement Variation | 61,5% | 62,8% | 61,0% |
| | | +2,1% | -0,8% |
| Proportion de véhicules remplacés selon le scénario optimiste Variation | 48,8% | 49,9% | 48,3% |
| | | +2,3% | -1,0% |

Le tableau montre premièrement que la valeur utilisée n'a aucun impact dans le calcul des émissions de 2018. C'est logique étant donné le faible nombre de VE en circulation cette année-là. Logiquement, plus les VE émettent de GES, plus il en faut pour remplacer les VC dans le but d'atteindre les objectifs provinciaux, car la différence en émission entre les deux types de véhicules est moins élevée. Cependant, ces variations dans le nombre de véhicules à remplacer sont très faibles en comparaison aux variations d'émission étudiées.

Ainsi, le choix dans la valeur d'émission des VE n'a que très peu d'influence sur le nombre de VC à remplacer par des VE, car les émissions moyennes des VC sont largement supérieures à celles des VE.

CHAPITRE 6 DISCUSSION GÉNÉRALE

Pour résumer, ce mémoire a essayé d'évaluer le potentiel des VE pour réduire les émissions de GES à Montréal en suivant plusieurs étapes que nous allons rappeler ci-dessous.

Premièrement, le calcul des émissions de la flotte de véhicules particuliers à Montréal s'est largement appuyé sur des travaux de recherche antérieurs, en réutilisant et en modifiant la fonction permettant de calculer les GES émis sur une année par exemple. De nombreuses hypothèses simplificatrices ont été posées dans cette partie. Certaines ont peu d'impact sur le résultat, comme la valeur des émissions indirectes de GES des VE. D'autres peuvent l'influencer de manière importante : les émissions totales sont directement proportionnelles au facteur d'annualisation utilisé, si celui-ci est unique pour tous les déplacements.

Ensuite, l'estimation des émissions de 1990 s'est surtout appuyée sur les données disponibles et non sur des calculs très détaillés. La valeur estimée dépend en fait surtout des données provinciales et des émissions de 2018 à Montréal calculées dans ce mémoire. Les comportements de mobilité de 1990 et leur différence avec ceux de 2018 n'ont pas été étudiés par manque de données et de temps.

La méthodologie utilisée pour les calculs permettant de déterminer le nombre de VC à remplacer par des VE n'avait pas encore été observée dans la littérature, et a pu donner des résultats intéressants en comparant les groupes d'émissions prioritaires pour le remplacement. Cependant, les calculs permettant de créer une flotte initiale pour 2030 auraient bénéficié de plus de précision ainsi que ceux permettant de calculer les émissions pour cette même année. En effet les comportements de mobilité en 2030 sont supposés semblables à ceux de 2018, tout comme ceux de 1990. On peut aussi noter que la méthodologie utilisée est assez peu sensible aux hypothèses concernant le facteur d'annualisation, qui influence grandement les résultats des émissions de 2018, ou même les émissions indirectes des VE.

Finalement, l'analyse des ventes passées pour estimer les tendances futures a été réalisée avec des méthodes déjà connues et utilisées dans des travaux antérieurs, mais le manque de données pour calibrer les modèles nous pousse à prendre de la distance par rapport aux résultats.

En conclusion, les résultats obtenus dans ce mémoire, bien que donnant des pistes de réflexion intéressantes concernant des stratégies possibles de remplacement des VC par des VE, doivent être abordés avec précautions. En effet, ils dépendent de nombreuses hypothèses qu'il est nécessaire de connaître et qui seront rappelées en section 7.2.

CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

7.1 Synthèse des travaux

Ce mémoire a donc exploré l'évolution du nombre de véhicules dans la flotte montréalaise selon deux approches : l'une en cherchant à atteindre les objectifs donnés et l'autre en utilisant comme point de départ les données connues des années passées. Les émissions actuelles ont été estimées à 5,52 MtCO₂ en 2018, ce qui représente une augmentation forte par rapport aux niveaux de 1990 estimés à 3,7 MtCO₂. Pour atteindre l'objectif de réduction de 37,5% par rapport à cette année, le flotte des véhicules particuliers de Montréal doit diminuer ses émissions de 2018 de 58,2%.

La première approche de remplacement des VC par des VE, qui utilise les cinq scénarios, montre que les choix déterminant la méthode de remplacement ont un impact important sur le nombre de véhicules à remplacer. Par exemple, le scénario le plus pessimiste nécessiterait le remplacement de 2 millions de véhicules. L'écart de ce résultat avec celui du scénario le plus optimiste est de l'ordre de 600 000 véhicules.

La deuxième approche de remplacement, utilisant les données des années passées pour prévoir les ventes futures, a utilisé trois modèles. Les résultats ont montré que les données actuellement disponibles permettent de prédire une évolution du marché crédible seulement en fixant le potentiel de marché à long terme au préalable. Au regard des analyses des flottes de Montréal et de toute la province, nous pouvons conclure que les objectifs de réduction d'émissions ne seront probablement pas atteints si les ventes poursuivent les tendances actuelles.

7.2 Limitations de la solution proposée

Ces approches comportent tout de même plusieurs limitations.

Premièrement, de nombreuses hypothèses posées dans la méthode peuvent être questionnées. Par exemple, l'estimation des taux d'occupation des véhicules pour lesquels la valeur n'était pas renseignée aurait pu bénéficier d'une analyse selon la géographie, l'heure du déplacement ou encore le motif de déplacement. Les déplacements en pointe pour se rendre au travail seraient donc probablement moins occupés, alors que ceux pour le motif loisir le seraient plus par exemple. D'une manière plus générale, les traitements des valeurs manquantes, au lieu de s'appuyer sur des valeurs moyennes obtenues via les autres enregistrements, auraient pu

s'appuyer plus en détail sur les caractéristiques des répondants et des déplacements.

Le facteur d'annualisation de 335 peut évidemment être questionné, même si nous avons vu que sa valeur influençait peu le nombre de véhicules à remplacer par des VE pour atteindre les objectifs provinciaux. Une valeur plus faible diminuerait les émissions totales de la province mais augmenterait faiblement le nombre de véhicules à replacer par des VE. Un facteur variant géographiquement pourrait aussi apporter plus de détails. Plus généralement, il est risqué d'annualiser les résultats de l'enquête OD, car celle-ci n'enregistre que les déplacements faits pendant la semaine, et car les émissions de CO₂ dépendent aussi d'autres facteurs comme la température, qui varie différemment des comportements de mobilité annuels. Des températures plus froides ajouteraient des émissions de CO₂ lors des démarrages à froid, et des températures plus chaudes ajouteraient des émissions de CO₂ via l'utilisation de la climatisation.

La jointure des bases des Ressources Naturelles Canada et de la SAAQ a aussi nécessité la modification d'une grande partie des données. Des modifications différentes auraient pu aussi influencer les résultats.

Aussi, l'évolution des comportements et de la population selon les catégories d'âge n'a pas été abordé dans cette étude pour estimer les émissions de 1990 et pour prédire les émissions de 2030. Ces aspects, qui pourraient faire varier le nombre de veh.km parcourus pour ces années, ont été supposés constants pour tous les calculs. Par exemple, si la part modale de l'automobile était plus faible en 2030, les émissions de Montréal le seraient aussi.

Enfin, aucune analyse selon les variables sociodémographiques des ménages n'a été faite. Cela permettrait possiblement de comprendre certains comportements de déplacements et ainsi mieux estimer les émissions de GES pour 1990 et 2030.

Ces points n'ont donc pas été abordés dans ce mémoire par manque de temps, mais pourraient faire l'objet de nouvelles recherches.

Comme précisé dans l'article du chapitre 4, les émissions de 1990 ont été estimées à partir de plusieurs données. On retrouve entre autres parmi elles les émissions de 2018 calculées dans ce même document. Cela signifie qu'il est impossible d'interpréter les différences de valeurs entre les émissions de 2018 et de 1990 par des considérations territoriales ou par des données spécifiques concernant Montréal.

Ce mémoire s'est aussi concentré sur la modification d'un unique paramètre : le nombre de VE dans la flotte. Bien que cela donne une idée assez claire de l'importance de ce paramètre dans l'atteinte des objectifs, cela ne représente pas vraiment la réalité. Par exemple, réduire les veh.km parcourus ou bien modifier les parts modales des déplacements aurait influencé

les résultats.

De plus, seul le CO₂ émis lors de l'utilisation du véhicule a été pris en compte. Le rapport du CIRAIQ [7] indique que cette émission est responsable de moins de 10 % des émissions totales d'un VE. L'avantage du VE du point de vue des émissions de GES est donc probablement surestimé dans ce mémoire. Si cette étude était menée avec une approche d'analyse de cycle de vie, elle donnerait sûrement une vue d'ensemble plus précise sur les impacts climatiques globaux liés à un tel changement dans la flotte, plutôt que de simplement satisfaire les objectifs locaux de réduction des émissions.

Enfin, nous avons supposé que tous les secteurs économiques devaient réduire leurs émissions au même rythme. Or, la cible provinciale de réduction de 37,5% des émissions de GES par rapport aux niveaux de 1990 concerne les émissions globales au Québec. Ainsi, il est possible qu'une bonne stratégie soit de diminuer encore plus les émissions du transport pour empêcher d'autres secteurs d'être trop impactés. Inversement, si le secteur du transport semble peu propice à effectuer de tels changements, d'autres secteurs peuvent viser des diminutions d'émission de GES plus importantes.

D'un point de vue beaucoup plus général, une approche visant à remplacer un nombre suffisant de VC par des VE à Montréal permet théoriquement d'atteindre les objectifs provinciaux. Pourtant une telle stratégie, menée par exemple avec le système de production d'électricité des Etats-Unis qui émet plus de 10 fois plus de CO₂ qu'au Québec, ne permettrait même pas d'atteindre cet objectif en convertissant la totalité de la flotte. Par rapport à cela, une thèse [53] a déjà calculé l'impact sur les ressources minérales d'un remplacement total de la flotte mondiale par des VE. On y apprend que selon les réserves disponibles, cela serait possible seulement une cinquantaine d'années avant de manquer de matériaux nécessaires à la fabrication de batteries tels que le Lithium ou le Cobalt. Ainsi, le remplacement d'une grande partie de la flotte par des VE, bien qu'il semble représenter une solution théorique pour limiter les GES émis dans la province, n'est pas applicable durablement à l'échelle mondiale. Cette solution doit plutôt être couplée avec d'autres mesures comme le développement des transports en commun ou bien des transports actifs par exemple, ce qui permettrait de faire diminuer le nombre de veh.km parcourus en auto en plus de faire diminuer les émissions de CO₂ au km.

7.3 Améliorations futures

Comme vu dans les limites, de nombreuses hypothèses, posées dans cette étude pour simplifier les calculs, pourraient être revues pour affiner les résultats. Par exemple, les calculs

pourraient être répétés avec un nombre de catégories d'émission plus élevé, cela améliorerait la précision des résultats. Aussi, les valeurs moyennes utilisées pour les taux d'occupation pourraient être revues. Les estimations des émissions de 1990 et de 2030 bénéficieraient aussi d'une étude ne supposant pas les comportements de mobilité constants et prenant en compte certaines données sociodémographiques.

Comme dit dans l'article dans le chapitre 4, une étude à une échelle plus précise, par exemple à celle des aires de diffusion, donnerait plus d'informations et plus d'options pour les choix de remplacement des véhicules. Les données de l'enquête OD, dont le secteur municipal constitue la strate d'échantillonnage, devraient cependant suivre un traitement particulier pour pouvoir être utilisées à une échelle géographique plus petite. Inversement, une étude à l'échelle de la province donnerait des résultats plus généraux qui seraient plus faciles à comparer aux objectifs provinciaux. Cependant, il est plus difficile d'estimer les émissions hors des grandes villes avec la méthode utilisée dans ce mémoire car ces territoires ne sont pas couverts par les enquêtes OD.

Une étude semblable prenant en compte le cycle de vie des véhicules pourrait aussi être envisagée. Elle permettrait une meilleure compréhension des autres impacts des VE comme l'épuisement des ressources minérales. Cependant, il serait plus difficile de comparer les résultats avec les objectifs provinciaux qui ne s'intéressent qu'aux émissions directes.

Finalement, il serait peut-être intéressant de refaire les simulations du chapitre 5.1 après quelques années supplémentaires. Cela permettrait de confirmer ou infirmer les résultats de ce mémoire avec plus de données au départ.

RÉFÉRENCES

- [1] World Meteorological Organization, “Proceedings of the world climate conference, a conference of experts on climate and mankind,” Rapport technique, 02 1979. [En ligne]. Disponible : https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=8346
- [2] United Nations, “Kyoto protocol to the united nations framework convention on climate change,” Rapport technique, 1998.
- [3] —, “Adoption of the paris agreement,” Rapport technique, 2015.
- [4] Ministère du Développement durable, de l’Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, “Cible de réduction d’émissions de gaz à effet de serre du québec pour 2030 – document de consultation,” Rapport technique, 2015. [En ligne]. Disponible : https://moodle.polymtl.ca/pluginfile.php/413972/mod_page/content/70/Gouvernement%20du%20Qu%20C3%A9bec%20-%20Cibles%20C3%89mission%20de%20GES%20pour%202030_2015-09-18.pdf
- [5] J. Whitmore et P.-O. Pineau, “État de l’énergie au québec 2021,” Chaire de gestion du secteur de l’énergie, HEC Montréal, Rapport technique, 2021. [En ligne]. Disponible : https://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2021/02/EEQ2021_web.pdf
- [6] Les différences entre un moteur électrique et un moteur à combustion. Disponible : <https://beqtechnology.com/blog/differences-moteur-electrique-et-moteur-combustion/>. [En ligne]. Disponible : <https://beqtechnology.com/blog/differences-moteur-electrique-et-moteur-combustion/>
- [7] P.-O. Roy, J.-F. Ménard, S. Fallaha et R. Samson, “Analyse du cycle de vie comparative des impacts environnementaux potentiels du véhicule électrique et du véhicule conventionnel dans un contexte d’utilisation québécois,” CIRAIQ, Rapport technique, 04 2016. [En ligne]. Disponible : <https://www.hydroquebec.com/data/developpement-durable/pdf/analyse-comparaison-vehicule-electrique-vehicule-conventionnel.pdf>
- [8] A. Levasseur, S. Mercier-Blais, Y. Prairie, A. Tremblay et C. Turpin, “Amélioration de la précision de l’empreinte carbone de l’électricité : estimation des émissions de gaz à effet de serre des réservoirs hydroélectriques,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 136, p. 110433, 2021. [En ligne]. Disponible : <https://www.hydroquebec.com/data/developpement-durable/pdf/amelioration-precision-empreinte-carbone-electricite.pdf>
- [9] E. Mallia et G. Lewis, “Life cycle greenhouse gas emissions of electricity generation in the province of ontario, canada,” *The International Journal of Life*

- Cycle Assessment*, vol. 18, n^o. 2, p. 377–391, 2013. [En ligne]. Disponible : <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-012-0501-0#citeas>
- [10] Ministry of Energy, “The end of coal,” Rapport technique, 07 2021, available at : <https://www.ontario.ca/page/end-coal>. [En ligne]. Disponible : <https://www.ontario.ca/page/end-coal>
- [11] U.S. Energy Information Administration, “How much carbon dioxide is produced per kilowatthour of u.s. electricity generation?” Rapport technique, 2020. [En ligne]. Disponible : <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=74&t=11>
- [12] F. Del Pero, M. Delogu et M. Pierini, “The effect of lightweighting in automotive lca perspective : Estimation of mass-induced fuel consumption reduction for gasoline turbocharged vehicles,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 154, p. 566–577, 2017. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617307096>
- [13] “Estimations de la population des municipalités selon le groupe d’âge et le sexe, québec, 1er juillet 2001 à 2020, *Institut de la Statistique du Québec*, available at : <https://statistique.quebec.ca/fr/fichier/excel-estimations-de-la-population-des-municipalites-selon-le-groupe-dage-et-le-sexe-quebec-2001-2020.xlsx>,” 2021.
- [14] ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l’Électrification des transports,, “Transporter le québec vers la modernité, politique de mobilité durable – 2030, plan d’action 2018-2023,” Rapport technique, 2018.
- [15] W. Yang, S. Wang et X. Zhao, “Measuring the direct and indirect effects of neighborhood-built environments on travel-related co2 emissions : A structural equation modeling approach,” *Sustainability*, vol. 10, n^o. 5, 2018. [En ligne]. Disponible : <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/5/1372>
- [16] S. A. H. Zahabi, L. Miranda-Moreno, Z. Patterson et P. Barla, “Impacts of built environment and emerging green technologies on daily transportation greenhouse gas emissions in quebec cities : a disaggregate modeling approach,” *Transportation*, vol. 44, n^o. 1, p. 159–180, 2017.
- [17] S. A. H. Zahabi, L. Miranda-Moreno, Z. Patterson, P. Barla et C. Harding, “Transportation greenhouse gas emissions and its relationship with urban form, transit accessibility and emerging green technologies : A montreal case study,” *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 54, p. 966–978, 2012. [En ligne]. Disponible : <https://polymtl.on.worldcat.org/oclc/4937111056>
- [18] E. O. D. Waygood, Y. Sun et Y. O. Susilo, “Transportation carbon dioxide emissions by built environment and family lifecycle : Case study of the osaka metropolitan area,”

- Transportation Research Part D*, vol. 31, p. 176–188, 2014. [En ligne]. Disponible : <https://polymtl.on.worldcat.org/oclc/5901468268>
- [19] P. Barla, L. F. Miranda-Moreno et M. Lee-Gosselin, “Urban travel co2 emissions and land use : A case study for quebec city,” *Transportation Research Part D*, vol. 16, n°. 6, p. 423–428, 2011. [En ligne]. Disponible : <https://polymtl.on.worldcat.org/oclc/4933975539>
- [20] C. D. Waldron, J. Harnisch, O. Lucon, R. S. Mckibbon, S. B. Saile, F. Wagner et et Michael P. Walsh, *Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre, volume 2, Energie*, 2006, ch. Combustion mobile. [En ligne]. Disponible : https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/french/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf
- [21] J. Hagman, S. Ritzén, J. J. Stier et Y. Susilo, “Total cost of ownership and its potential implications for battery electric vehicle diffusion,” *Research in Transportation Business and Management*, vol. 18, p. 11–17, 2016. [En ligne]. Disponible : <https://polymtl.on.worldcat.org/oclc/5975186021>
- [22] B. Propfe, D. Kreyenberg, J. Wind et S. Schmid, “Market penetration analysis of electric vehicles in the german passenger car market towards 2030,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, n°. 13, p. 5201–5208, 2013. [En ligne]. Disponible : <https://polymtl.on.worldcat.org/oclc/5900533376>
- [23] B. M. Al-Alawi et T. H. Bradley, “Review of hybrid, plug-in hybrid, and electric vehicle market modeling studies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 21, p. 190–203, 2013.
- [24] M. Kloess et A. Müller, “Simulating the impact of policy, energy prices and technological progress on the passenger car fleet in austria—a model based analysis 2010-2050,” *Energy Policy*, vol. 39, n°. 9, p. 5045–5062, 2011. [En ligne]. Disponible : <https://polymtl.on.worldcat.org/oclc/4929964180>
- [25] H. Ribberink et E. Entchev, “Electric vehicles—a ‘one-size-fits-all’ solution for emission reduction from transportation?” dans *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*. IEEE, 2013, p. 1–7.
- [26] Z. Wang, S. Erdogan et F. W. Ducca, “Evaluating the efficacy of zero-emission vehicle deployment strategies : The maryland case,” *Sustainability*, vol. 11, n°. 6, 2019. [En ligne]. Disponible : <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/6/1750>
- [27] C. Bauer, B. Cox, T. Heck, S. Hirschberg, J. Hofer, W. Schenler, A. Simons, A. Del Duce, H.-J. Althaus, G. Georges *et al.*, “Opportunities and challenges for electric mobility : an interdisciplinary assessment of passenger vehicles : Final report of the thelma project in

- co-operation with the swiss competence center for energy research “efficient technologies and systems for mobility”,” ETH Zurich, Rapport technique, 2016.
- [28] “Mobilité des personnes dans la région de montréal enquête origine-destination 2018, version 18.2b, processing : Pierre laffont,” 2020.
- [29] Autorité régionale du transport métropolitain, “Enquête origine-destination 2018, la mobilité des personnes dans la région métropolitaine de montréal,” Rapport technique, 06 2020, technical report. [En ligne]. Disponible : https://www.artm.quebec/wp-content/uploads/2020/06/document-mobilite_EOD_2018.pdf
- [30] “Véhicules en circulation, 2018, *Société d’assurance automobile Québec (SAAQ)*, available at : <https://saaq.gouv.qc.ca/donnees-ouvertes/vehicules-circulation/vehicule-en-circulation-2018.csv>, processing : Pierre laffont,” 2020. [En ligne]. Disponible : <https://saaq.gouv.qc.ca/donnees-ouvertes/vehicules-circulation/Vehicule-en-circulation-2018.csv>
- [31] “Fuel consumption ratings, *Natural Resources Canada*, contains information licensed under the open government licence – canada. available at : <https://open.canada.ca/data/en/dataset/98f1a129-f628-4ce4-b24d-6f16bf24dd64>,” 2021. [En ligne]. Disponible : <https://open.canada.ca/data/en/dataset/98f1a129-f628-4ce4-b24d-6f16bf24dd64>
- [32] “Osmr api documentation, available at : <http://project-osrm.org/docs/v5.5.1/api/>,” 2021. [En ligne]. Disponible : <http://project-osrm.org/docs/v5.5.1/api/#general-options>
- [33] “Here api documentation, © 2021 here, available at : <https://developer.here.com/documentation>,” 2021. [En ligne]. Disponible : <https://developer.here.com/documentation>
- [34] Société de transport de Montréal et Comité de Pilotage pour la Quantification des émissions de GES évitées dans la région de Montréal, “Rapport de quantification des émissions de gaz à effet de serre évitées par le transport collectif dans la région métropolitaine de montréal,” Rapport technique, 2016. [En ligne]. Disponible : https://www.stm.info/sites/default/files/pdf/fr/rapport_quantification_ges_evites.pdf
- [35] C. Morency et H. Verreault, “Réduction des gaz à effet de serre : Le télétravail peut-il y contribuer?” *Vecteur Environnement*, vol. 53, n°. 3, p. 30–33, 09 2020, copyright - Copyright Réseau Environnement Sep 2020; Dernière mise à jour - 2020-12-22. [En ligne]. Disponible : <https://www.proquest.com/scholarly-journals/reduction-des-gaz-a-effet-de-serre-le-teltravail/docview/2449283952/se-2?accountid=40695>
- [36] C. JEANJACQUOT, “Évaluation de l’intermodalité à montréal,” 2011.

- [37] J.-F. Morissette, F. St-Laurent et S.-P. Rioux. (2019, 02) Statistiques saaq-avÉq sur l'électromobilité au québec en date du 31 décembre 2018.
- [38] D. Jasmin, "Électricité 101 : la consommation des véhicules électriques," *roulezelelectricite.com*, 02 2019. [En ligne]. Disponible : <https://roulezelelectricite.com/electricite-101-la-consommation-des-vehicules-electriques/>
- [39] F. Delisle, V. Leblond, J. Paradis, C. Rioux, O. Lacroix, S. Lamarre, V. Leblond, A. Normandin, P.-L. Rousseau et V. Turcotte, "Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2018 et leur évolution depuis 1990," Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Rapport technique, 2020. [En ligne]. Disponible : <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/2018/inventaire1990-2018.pdf>
- [40] Ville de Montréal, "Profil sociodémographique recensement 2016, région métropolitaine de recensement de montréal," Rapport technique, 05 2018. [En ligne]. Disponible : http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/MTL_STATS_FR/MEDIA/DOCUMENTS/PROFIL_SOCIOD%29MO_RMR%20MONTR%29AL%202016.PDF
- [41] "Statistics Canada. table 17-10-0005-01 population estimates on July 1st, by age and sex available at : <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/en/tv.action?pid=1710000501>," 2020.
- [42] G. Whelan, "Modelling car ownership in Great Britain," *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, vol. 41, n° 3, p. 205–219, 2007.
- [43] G. Lansley, "Cars and socio-economics : understanding neighbourhood variations in car characteristics from administrative data," *Regional Studies, Regional Science*, vol. 3, n° 1, p. 264–285, 2016.
- [44] Institut de la statistique du Québec, "Perspectives démographiques du Québec et des régions, 2016-2066, Édition 2019," Rapport technique, 07 2019. [En ligne]. Disponible : <https://statistique.quebec.ca/fr/fichier/perspectives-demographiques-du-quebec-et-des-regions-2016-2066-edition-2019.pdf>
- [45] S. Shenstone-Harris, N. Rivers et M. Paterson, "Have we reached peak driving? : A 25-year decomposition of vehicle trends in Canada," Mémoire de maîtrise, University of Ottawa, 2016. [En ligne]. Disponible : https://ruor.uottawa.ca/bitstream/10393/36100/1/ShenstoneHarris_Sarah_HaveWeReachedPeakedDriving.pdf
- [46] J.-F. Morissette, F. St-Laurent et S.-P. Rioux. (2021, 05) Statistiques saaq-aveq sur l'électromobilité au Québec en date de 31 mars 2021.
- [47] W. McManus et R. Senter Jr, "Market models for predicting PHEV adoption and diffusion," University of Michigan, Ann Arbor, Transportation Research Institute,

- Rapport technique, 2009. [En ligne]. Disponible : <https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/64436/102399.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [48] Hydro-Québec, “Portrait des ressources énergétiques d’hydro-québec,” Rapport technique, 11 2019. [En ligne]. Disponible : <https://www.hydroquebec.com/data/achats-electricite-quebec/pdf/portrait-ressources-energetiques.pdf>
- [49] Statistique Canada, “Enquête sur les véhicules au canada : annuelle,” Rapport technique, 2007. [En ligne]. Disponible : <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/53-223-x/53-223-x2007000-fra.pdf>
- [50] Statistics Canada, “Commuting to work, national household survey (nhs),” Rapport technique, 2011. [En ligne]. Disponible : https://www12.statcan.gc.ca/nhs-enm/2011/as-sa/99-012-x/99-012-x2011003_1-eng.pdf
- [51] Gouvernement du Québec, “Plan pour une économie verte 2030,” Rapport technique, 2020. [En ligne]. Disponible : <https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/environnement/publications-adm/plan-economie-verte/plan-economie-verte-2030.pdf?1605549736>
- [52] A. Janssen, “By the numbers : Average age of u.s. / canadian fleets,” *Auto service world*, 2020. [En ligne]. Disponible : <https://www.autoserviceworld.com/by-the-numbers-average-age-of-u-s-canadian-fleets/>
- [53] V. De Bruille, “Impact de l’utilisation des ressources minérales et métalliques dans un contexte cycle de vie : une approche fonctionnelle,” Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, 2014.

**ANNEXE A MODIFICATIONS DE LA BASE DES RESSOURCES
NATURELLES CANADA**

| | marque | préfixe modèle initial | nouveau modèle (nom exact) |
|----|--------|------------------------|----------------------------|
| 0 | MAZDA | 3 | 3 |
| 1 | MAZDA | 5 | 5 |
| 2 | MAZDA | 6 | 6 |
| 3 | MAZDA | CX-3 | CX-3 |
| 4 | MAZDA | CX-5 | CX-5 |
| 5 | MAZDA | CX-9 | CX-9 |
| 6 | MAZDA | 323 | 323 |
| 7 | MAZDA | 929 | 929 |
| 8 | MAZDA | MPV | MPV |
| 9 | MAZDA | MX-3 | MX-3 |
| 10 | MAZDA | MX-5 | MX-5 |
| 11 | MAZDA | RX-7 | RX7 |
| 12 | MAZDA | RX-8 | RX8 |
| 13 | MAZDA | CX-7 | CX-7 |
| 14 | MAZDA | SPEED | SPEED |
| 15 | MAZDA | RX-8 | RX8 |
| 16 | BMW | 318 | 318 |
| 17 | BMW | 325 | 325 |
| 18 | BMW | 525 | 525 |
| 19 | BMW | 530 | 530 |
| 20 | BMW | 540 | 540 |
| 21 | BMW | 740 | 740 |
| 22 | BMW | X1 | X1 |
| 23 | BMW | X2 | X2 |
| 24 | BMW | X3 | X3 |
| 25 | BMW | X4 | X4 |
| 26 | BMW | X5 | X5 |
| 27 | BMW | X6 | X6 |
| 28 | BMW | M3 | M3 |
| 29 | BMW | M4 | M4 |
| 30 | BMW | M6 | M6 |

| | marque | préfixe modèle initial | nouveau modèle (nom exact) |
|----|--------|------------------------|----------------------------|
| 31 | BMW | 320I | 320I |
| 32 | BMW | 750I | 750 |
| 33 | BMW | 750L | 750 |
| 34 | BMW | 850C | 850 |
| 35 | BMW | 328I | 328 |
| 36 | BMW | 328D | 328 |
| 37 | BMW | 328C | 328 |
| 38 | BMW | 328X | 328 |
| 39 | BMW | 528XI | 528 |
| 40 | BMW | 528I | 528 |
| 41 | BMW | 528I | 528 |
| 42 | BMW | 323CI | 323 |
| 43 | BMW | 323I | 323 |
| 44 | BMW | 323I | 323 |
| 45 | BMW | 323IS | 323 |
| 46 | BMW | M5 SE | M5 |
| 47 | BMW | M5 CO | M5 |
| 48 | BMW | Z3 RO | Z3 |
| 49 | BMW | Z4 RO | Z4 |
| 50 | BMW | Z4 3. | Z4 |
| 51 | BMW | Z4 SD | Z4 |
| 52 | BMW | Z4 M4 | Z4 |
| 53 | BMW | 330CI | 330 |
| 54 | BMW | 330XI | 330 |
| 55 | BMW | 330I | 330 |
| 56 | BMW | 330I | 330 |
| 57 | BMW | 335I | 335 |
| 58 | BMW | 335I | 335 |
| 59 | BMW | 335XI | 335 |
| 60 | BMW | 335IS | 335 |
| 61 | BMW | 335D | 335 |
| 62 | BMW | 335D | 335 |
| 63 | BMW | M ROA | M |
| 64 | BMW | M COU | M |
| 65 | BMW | 745I | 745 |
| 66 | BMW | 745LI | 745 |
| 67 | BMW | 760LI | 760 |
| 68 | BMW | 760I | 760 |
| 69 | BMW | M760I | M760 |
| 70 | BMW | M760L | M760 |

| | marque | préfixe modèle initial | nouveau modèle (nom exact) |
|-----|--------|------------------------|----------------------------|
| 71 | BMW | 545I | 545 |
| 72 | BMW | 650CI | 650 |
| 73 | BMW | 650I | 650 |
| 74 | BMW | 535I | 535 |
| 75 | BMW | 535I | 535 |
| 76 | BMW | 535D | 535 |
| 77 | BMW | 535XI | 535 |
| 78 | BMW | 550I | 550 |
| 79 | BMW | 550I | 550 |
| 80 | BMW | 645CI | 645 |
| 81 | BMW | 128I | 128 |
| 82 | BMW | 135I | 135 |
| 83 | BMW | 428I | 428 |
| 84 | BMW | 435I | 435 |
| 85 | BMW | 640I | 640 |
| 86 | BMW | 228I | 228 |
| 87 | BMW | 228I | 228 |
| 88 | BMW | 340I | 340 |
| 89 | BMW | 340I | 340 |
| 90 | BMW | 230I | 230I |
| 91 | BMW | 840CI | 840 |
| 92 | BMW | 840CL | 840 |
| 93 | BMW | 323 C | 323 |
| 94 | BMW | 128I | 128 |
| 95 | BMW | 135I | 135 |
| 96 | BMW | M2 CO | M2 |
| 97 | ACURA | 1.6 E | 1.6EL |
| 98 | ACURA | 2.3 C | 2.3CL |
| 99 | ACURA | 3.0 C | 3.0CL |
| 100 | ACURA | 3.2 T | 3.2TL |
| 101 | ACURA | 3.5 R | 3.5RL |
| 102 | ACURA | MDX A | MDX |
| 103 | ACURA | MDX 4 | MDX |
| 104 | ACURA | MDX S | MDX |
| 105 | ACURA | MDX H | MDX |
| 106 | ACURA | TLX S | TLX |
| 107 | ACURA | TLX A | TLX |
| 108 | ACURA | RL AW | RL |
| 109 | ACURA | RLX H | RLX |
| 110 | ACURA | RDX A | RDX |

| | marque | préfixe modèle initial | nouveau modèle (nom exact) |
|-----|--------|------------------------|----------------------------|
| 111 | ACURA | RSX T | RSX |
| 112 | ACURA | TL AW | TL |
| 113 | ACURA | ZDX A | ZDX |
| 114 | ACURA | ILX H | ILX |
| 115 | ALFA | 164 L | 164 |
| 116 | ALFA | 4C SP | 4C |
| 117 | ALFA | 4C CO | 4C |
| 118 | AUDI | R8 CO | R8 |
| 119 | AUDI | R8 SP | R8 |
| 120 | AUDI | R8 QU | R8 |
| 121 | AUDI | A7 QU | A7 |
| 122 | AUDI | SQ5 Q | SQ5 |
| 123 | AUDI | Q5 HY | Q5 |
| 124 | AUDI | Q5 TD | Q5 |
| 125 | AUDI | Q5 QU | Q5 |
| 126 | AUDI | Q3 QU | Q3 |
| 127 | AUDI | 90 QU | 90 |
| 128 | AUDI | A6 QU | A6 |
| 129 | AUDI | A6 WA | A6 |
| 130 | AUDI | A6 AV | A6 |
| 131 | AUDI | A6 AL | A6 |
| 132 | AUDI | A4 QU | A4 |
| 133 | AUDI | A4 AV | A4 |
| 134 | AUDI | A4 CA | A4 |
| 135 | AUDI | A4 AL | A4 |
| 136 | AUDI | A4 UL | A4 |
| 137 | AUDI | TTS C | TTS |
| 138 | AUDI | TTS R | TTS |
| 139 | AUDI | TT RO | TT |
| 140 | AUDI | TT CO | TT |
| 141 | AUDI | TT RS | TTRS |
| 142 | AUDI | A8 QU | A8 |
| 143 | AUDI | A8 L | A8 |
| 144 | AUDI | A8 TD | A8 |
| 145 | AUDI | A8L Q | A8 |
| 146 | AUDI | A8L T | A8 |
| 147 | AUDI | A8L | A8 |
| 148 | AUDI | A8L | A8 |
| 149 | AUDI | S4 QU | S4 |
| 150 | AUDI | S4 AV | S4 |

| | marque | préfixe modèle initial | nouveau modèle (nom exact) |
|-----|--------|------------------------|----------------------------|
| 151 | AUDI | S4 CA | S4 |
| 152 | AUDI | S8 QU | S8 |
| 153 | AUDI | S6 AV | S6 |
| 154 | AUDI | S6 QU | S6 |
| 155 | AUDI | RS 5 | RS5 |
| 156 | AUDI | RS 5 | RS5 |
| 157 | AUDI | RS 7 | RS7 |
| 158 | AUDI | RS 7 | RS7 |
| 159 | AUDI | RS 3 | RS3 |
| 160 | AUDI | S3 QU | S3 |
| 161 | AUDI | S7 QU | S7 |
| 162 | AUDI | A3 QU | A3 |
| 163 | AUDI | A3 TD | A3 |
| 164 | AUDI | A3 CA | A3 |
| 165 | AUDI | A5 QU | A5 |
| 166 | AUDI | A5 CA | A5 |
| 167 | AUDI | A5 CO | A5 |
| 168 | AUDI | A5 SP | A5 |
| 169 | AUDI | Q7 TD | Q7 |
| 170 | AUDI | RS5 C | RS5 |
| 171 | AUDI | S5 CA | S5 |
| 172 | AUDI | S5 CO | S5 |
| 173 | AUDI | S5 QU | S5 |
| 174 | AUDI | S5 SP | S5 |
| 175 | BUICK | PARK | PARK |
| 176 | CADIL | SRX A | SRX |
| 177 | CADIL | STS A | STS |
| 178 | CADIL | STS # | STS |
| 179 | CADIL | CTS # | CTS |
| 180 | CADIL | CTS A | CTS |
| 181 | CADIL | CTS S | CTS |
| 182 | CADIL | CTS C | CTS |
| 183 | CADIL | ATS A | ATS |
| 184 | CADIL | XTS A | XTS |
| 185 | CADIL | XTS V | XTS |
| 186 | CADIL | CT6 A | CT6 |
| 187 | CADIL | XT5 A | XT5 |
| 188 | CADIL | XT4 A | XT4 |
| 189 | CADIL | CTS V | CTS |
| 190 | CHEVR | G10/G | G10 |

| | marque | préfixe modèle initial | nouveau modèle (nom exact) |
|-----|--------|------------------------|----------------------------|
| 191 | CHEVR | G20 S | G20 |
| 192 | CHEVR | G30 S | G30 |
| 193 | CHEVR | G30 V | G30 |
| 194 | CHEVR | HHR P | HHR |
| 195 | CHEVR | HHR T | HHR |
| 196 | CHEVR | HHR F | HHR |
| 197 | CHEVR | HHR S | HHR |
| 198 | CHEVR | TRAX | TRAX |
| 199 | CHEVR | CITY | CITY |
| 200 | CHEVR | S10 # | S10 |
| 201 | CHEVR | S10 4 | S10 |
| 202 | CHEVR | S10 B | S10 |
| 203 | CHEVR | S10 P | S10 |
| 204 | CHEVR | S10 F | S10 |
| 205 | CHEVR | SSR P | SSR |
| 206 | CHEVR | AVEO | AVEO |
| 207 | CHRYS | TOWN | TOWN |
| 208 | CHRYS | 300 A | 300 |
| 209 | CHRYS | 300 F | 300 |
| 210 | CHRYS | 300 S | 300 |
| 211 | CHRYS | 300 (| 300 |
| 212 | CHRYS | 300M | 300M |
| 213 | CHRYS | 300 M | 300M |
| 214 | CHRYS | 300C | 300C |
| 215 | CHRYS | 200 C | 200 |
| 216 | CHRYS | 200 S | 200 |
| 217 | CHRYS | 200 F | 200 |
| 218 | CHRYS | 200 A | 200 |
| 219 | CHRYS | NEON | NEON |
| 220 | CHRYS | PT CR | PTCRU |
| 221 | CHRYS | NEW Y | NEWYO |
| 222 | DODGE | NEON | NEON |
| 223 | DODGE | DART | DART |
| 224 | DODGE | RAM 1 | RAM |
| 225 | DODGE | RAM 2 | RAM |
| 226 | DODGE | RAM 3 | RAM |
| 227 | DODGE | RAM S | RAM |
| 228 | FERRA | F355 | F355 |
| 229 | FERRA | F355/ | F355 |
| 230 | JEEP | NEW C | COMPA |

| | marque | préfixe modèle initial | nouveau modèle (nom exact) |
|-----|--------|------------------------|----------------------------|
| 231 | JEEP | NEW W | WRANG |
| 232 | LANDR | LAND | LANDR |
| 233 | LANDR | LR2 H | LR2 |
| 234 | LANDR | LR2 S | LR2 |
| 235 | LANDR | LR3 4 | LR3 |
| 236 | LANDR | LR3 V | LR3 |
| 237 | LANDR | LR4 V | LR4 |
| 238 | FORD | E150 | E150 |
| 239 | FORD | F150 | F150 |
| 240 | FORD | F250 | F250 |
| 241 | FORD | F-150 | F150 |
| 242 | FORD | FIVE- | FIVE |
| 243 | FORD | EDGE | EDGE |
| 244 | FORD | FLEX | FLEX |
| 245 | GMC | S15 J | S15 |
| 246 | GMC | S15 S | S15 |
| 247 | HONDA | CR-V | CR-V |
| 248 | HONDA | HR-V | HR-V |
| 249 | HYUND | XG300 | XG |
| 250 | HYUND | XG350 | XG |
| 251 | HYUND | KONA | KONA |
| 252 | INFIN | QX30 | QX30 |
| 253 | INFIN | QX50 | QX50 |
| 254 | INFIN | QX60 | QX60 |
| 255 | INFIN | QX70 | QX70 |
| 256 | INFIN | QX80 | QX80 |
| 257 | INFIN | QX56 | QX56 |
| 258 | INFIN | QX4 4 | QX4 |
| 259 | INFIN | FX35 | FX35 |
| 260 | INFIN | FX45 | FX45 |
| 261 | INFIN | FX37 | FX37 |
| 262 | INFIN | FX50 | FX50 |
| 263 | INFIN | M37X | M37 |
| 264 | INFIN | G37X | G37 |
| 265 | INFIN | G37X | G37 |
| 266 | INFIN | G37 C | G37 |
| 267 | INFIN | G37 S | G37 |
| 268 | INFIN | Q70 A | Q70 |
| 269 | INFIN | Q70 H | Q70 |
| 270 | INFIN | Q50 A | Q50 |

| | marque | préfixe modèle initial | nouveau modèle (nom exact) |
|-----|--------|------------------------|----------------------------|
| 271 | INFIN | Q50 H | Q50 |
| 272 | INFIN | Q50S | Q50 |
| 273 | INFIN | Q60S | Q60 |
| 274 | INFIN | Q60 A | Q60 |
| 275 | INFIN | Q60 C | Q60 |
| 276 | INFIN | G35X | G35 |
| 277 | INFIN | G35X | G35 |
| 278 | INFIN | G35 C | G35 |
| 279 | INFIN | G35 S | G35 |
| 280 | INFIN | G35 A | G35 |
| 281 | INFIN | G35 # | G35 |
| 282 | INFIN | M35 A | M35 |
| 283 | INFIN | M35X | M35 |
| 284 | INFIN | M35X | M35 |
| 285 | INFIN | EX35 | EX35 |
| 286 | INFIN | M45X | M45 |
| 287 | INFIN | G25X | G25 |
| 288 | INFIN | M56X | M56 |
| 289 | INFIN | JX35 | JX35 |
| 290 | JAGUA | XJR X | XJR |
| 291 | JAGUA | XJR L | XJR |
| 292 | JAGUA | XJR | XJR |
| 293 | JAGUA | XJS V | XJS |
| 294 | JAGUA | XK8 C | XK8 |
| 295 | JAGUA | XJ8L | XJ8 |
| 296 | JAGUA | XJ8 V | XJ8 |
| 297 | JAGUA | XKR-S | XKR |
| 298 | JAGUA | XKR # | XKR |
| 299 | JAGUA | XKR C | XKR |
| 300 | JAGUA | XJL S | XJL |
| 301 | JAGUA | XJL P | XJL |
| 302 | JAGUA | XJL 3 | XJL |
| 303 | JAGUA | XJL U | XJL |
| 304 | JAGUA | XJL A | XJL |
| 305 | JAGUA | XJ SP | XJ |
| 306 | JAGUA | XJ 8L | XJ |
| 307 | JAGUA | XJ SU | XJ |
| 308 | JAGUA | XJ 3. | XJ |
| 309 | JAGUA | XJ AW | XJ |
| 310 | JAGUA | XJ R- | XJ |

| | marque | préfixe modèle initial | nouveau modèle (nom exact) |
|-----|--------|------------------------|----------------------------|
| 311 | JAGUA | XK CO | XK |
| 312 | JAGUA | XK S. | XK |
| 313 | JAGUA | XE 35 | XE |
| 314 | JAGUA | XE 20 | XE |
| 315 | JAGUA | XE 25 | XE |
| 316 | JAGUA | XE P2 | XE |
| 317 | JAGUA | XE P3 | XE |
| 318 | JAGUA | XF SU | XF |
| 319 | JAGUA | XF 4. | XF |
| 320 | JAGUA | XF 5. | XF |
| 321 | JAGUA | XF I4 | XF |
| 322 | JAGUA | XF V6 | XF |
| 323 | JAGUA | XF 3. | XF |
| 324 | JAGUA | XF AW | XF |
| 325 | JAGUA | XF 20 | XF |
| 326 | JAGUA | XF 35 | XF |
| 327 | JAGUA | XF 25 | XF |
| 328 | JAGUA | XF 30 | XF |
| 329 | JAGUA | XF S_ | XF |
| 330 | JAGUA | XK 5. | XK |
| 331 | JAGUA | XK-R | XKR |
| 332 | JAGUA | XF S | XF |
| 333 | JAGUA | XK-R | XKR |
| 334 | JAGUA | XJR # | XJR |
| 335 | PLYMO | NEON | NEON |
| 336 | PONTI | VIBE | VIBE |
| 337 | PONTI | WAVE | WAVE |
| 338 | PONTI | G6 CO | G6 |
| 339 | PONTI | G6 FF | G6 |
| 340 | PONTI | G3 WA | G3 |
| 341 | PONTI | G3 HA | G3 |
| 342 | PONTI | G5 XF | G5 |
| 343 | PORSC | 928 G | 928 |
| 344 | PORSC | 911 C | 911 |
| 345 | PORSC | 911 T | 911 |
| 346 | PORSC | 911 G | 911 |
| 347 | PORSC | 911 S | 911 |
| 348 | SAAB | 900 S | 900 |
| 349 | SAAB | 900 T | 900 |
| 350 | SAAB | 9000 | 9000 |

| | marque | préfixe modèle initial | nouveau modèle (nom exact) |
|-----|--------|------------------------|----------------------------|
| 351 | SAAB | 9-3 T | 9-3 |
| 352 | SAAB | 9-3 A | 9-3 |
| 353 | SAAB | 9-3 L | 9-3 |
| 354 | SAAB | 9-3 S | 9-3 |
| 355 | SAAB | 9-3 V | 9-3 |
| 356 | SAAB | 9-3 C | 9-3 |
| 357 | SAAB | 9-5 T | 9-5 |
| 358 | SAAB | 9-5 W | 9-5 |
| 359 | SAAB | 9-5 A | 9-5 |
| 360 | SAAB | 9-5 L | 9-5 |
| 361 | SAAB | 9-5 S | 9-5 |
| 362 | SAAB | 9-2X | 9-2 |
| 363 | SAAB | 9-7X | 9-7X |
| 364 | SATUR | L100/ | L100 |
| 365 | SATUR | VUE A | VUE |
| 366 | SATUR | VUE H | VUE |
| 367 | SATUR | ION # | ION |
| 368 | SATUR | AURA | AURA |
| 369 | SATUR | SKY T | SKY |
| 370 | SUBAR | SVX A | SVX |
| 371 | SUBAR | SVX 4 | SVX |
| 372 | SUBAR | BAJA | BAJA |
| 373 | SUBAR | B9 TR | B9 |
| 374 | SUBAR | WRX A | WRX |
| 375 | SUBAR | WRX S | WRX |
| 376 | SUBAR | BRZ T | BRZ |
| 377 | SUBAR | XV CR | XVCRO |
| 378 | SUZUK | SX4 J | SX4 |
| 379 | SUZUK | SX4 S | SX4 |
| 380 | SUZUK | SX4 A | SX4 |
| 381 | SUZUK | SX4 C | SX4 |
| 382 | SUZUK | SX4 H | SX4 |
| 383 | SUZUK | XL-7 | XL7 |
| 384 | SUZUK | XL7 A | XL7 |
| 385 | SUZUK | X-90 | X90 |
| 386 | TOYOT | T100 | T100 |
| 387 | TOYOT | RAV4 | RAV4 |
| 388 | TOYOT | ECHO | ECHO |
| 389 | TOYOT | 4-RUN | 4RUNN |
| 390 | TOYOT | FJ CR | FJCRU |

| | marque | préfixe modèle initial | nouveau modèle (nom exact) |
|-----|--------|------------------------|----------------------------|
| 391 | VOLKS | GOLF | GOLF |
| 392 | VOLKS | GOLF/ | GOLF |
| 393 | VOLKS | GTI V | GTI |
| 394 | VOLKS | CC 4M | CC |
| 395 | LEXUS | ES 30 | ES |
| 396 | LEXUS | ES 33 | ES |
| 397 | LEXUS | ES 35 | ES |
| 398 | LEXUS | RX 30 | RX |
| 399 | LEXUS | RX 33 | RX |
| 400 | LEXUS | RX 35 | RX |
| 401 | LEXUS | RX 40 | RX |
| 402 | LEXUS | RX 45 | RX |
| 403 | LEXUS | GS F | GS-F |
| 404 | LEXUS | GS 30 | GS |
| 405 | LEXUS | GS 40 | GS |
| 406 | LEXUS | GS 43 | GS |
| 407 | LEXUS | GS 35 | GS |
| 408 | LEXUS | GS 45 | GS |
| 409 | LEXUS | GS 46 | GS |
| 410 | LEXUS | GS 20 | GS |
| 411 | LEXUS | GX 47 | GX |
| 412 | LEXUS | GX 48 | GX |
| 413 | LEXUS | LX 47 | LX |
| 414 | LEXUS | LX 57 | LX |
| 415 | LEXUS | LS 40 | LS |
| 416 | LEXUS | LS 43 | LS |
| 417 | LEXUS | LS 46 | LS |
| 418 | LEXUS | LS 60 | LS |
| 419 | LEXUS | LS 50 | LS |
| 420 | LEXUS | IS F | IS-F |
| 421 | LEXUS | IS 20 | IS |
| 422 | LEXUS | IS 30 | IS |
| 423 | LEXUS | IS 25 | IS |
| 424 | LEXUS | IS 35 | IS |
| 425 | LEXUS | SC 43 | SC |
| 426 | LEXUS | HS 25 | HS |
| 427 | LEXUS | CT 20 | CT |
| 428 | LEXUS | RC F | RC-F |
| 429 | LEXUS | LC 50 | LC |
| 430 | VOLKS | NEW B | NEWBE |

| | marque | préfixe modèle initial | nouveau modèle (nom exact) |
|-----|--------|------------------------|----------------------------|
| 431 | VOLVO | 850 2 | 850 |
| 432 | VOLVO | 850 4 | 850 |
| 433 | VOLVO | 850 T | 850 |
| 434 | VOLVO | 850 A | 850 |
| 435 | VOLVO | 850 G | 850 |
| 436 | VOLVO | 850 W | 850 |
| 437 | VOLVO | 940 T | 940 |
| 438 | VOLVO | 940 W | 940 |
| 439 | VOLVO | 960 W | 960 |
| 440 | VOLVO | S70 C | S70 |
| 441 | VOLVO | S70 T | S70 |
| 442 | VOLVO | S70 A | S70 |
| 443 | VOLVO | S80/S | S80 |
| 444 | VOLVO | S80 T | S80 |
| 445 | VOLVO | S80 2 | S80 |
| 446 | VOLVO | S80 3 | S80 |
| 447 | VOLVO | S80 V | S80 |
| 448 | VOLVO | S80 A | S80 |
| 449 | VOLVO | V40 W | V40 |
| 450 | VOLVO | V40 T | V40 |
| 451 | VOLVO | V50 T | V50 |
| 452 | VOLVO | V50 2 | V50 |
| 453 | VOLVO | C30 T | C30 |
| 454 | VOLVO | C30 2 | C30 |
| 455 | VOLVO | V70R | V70 |
| 456 | VOLVO | V70 A | V70 |
| 457 | VOLVO | V70 G | V70 |
| 458 | VOLVO | V70 T | V70 |
| 459 | VOLVO | V70 W | V70 |
| 460 | VOLVO | V70 2 | V70 |
| 461 | VOLVO | V70 X | V70 |
| 462 | VOLVO | V70 R | V70 |
| 463 | VOLVO | V70 3 | V70 |
| 464 | VOLVO | S40 T | S40 |
| 465 | VOLVO | S40 2 | S40 |
| 466 | VOLVO | V60 C | V60 |
| 467 | VOLVO | V60 P | V60 |
| 468 | VOLVO | V60 T | V60 |
| 469 | VOLVO | V60 3 | V60 |
| 470 | VOLVO | S90 T | S90 |

| | marque | préfixe modèle initial | nouveau modèle (nom exact) |
|-----|--------|------------------------|----------------------------|
| 471 | VOLVO | XC40 | XC40 |
| 472 | VOLVO | XC60 | XC60 |
| 473 | VOLVO | XC90 | XC90 |
| 474 | VOLVO | V90 W | V90 |
| 475 | VOLVO | V90 C | V90 |
| 476 | VOLVO | V90 T | V90 |
| 477 | VOLVO | C70 C | C70 |
| 478 | VOLVO | C70 T | C70 |
| 479 | VOLVO | XC70 | XC70 |
| 480 | VOLVO | S60 2 | S60 |
| 481 | VOLVO | S60 T | S60 |
| 482 | VOLVO | S60 A | S60 |
| 483 | VOLVO | S60 R | S60 |
| 484 | VOLVO | S60 P | S60 |
| 485 | VOLVO | S60 3 | S60 |
| 486 | VOLVO | S60 C | S60 |
| 487 | VOLVO | S60 I | S60 |
| 488 | VOLVO | S70R | S70 |
| 489 | VOLVO | S70 G | S70 |
| 490 | LINCO | MARK | MARK |
| 491 | LINCO | TOWN | TOWN |
| 492 | LINCO | LS # | LS |
| 493 | LINCO | LS SP | LS |
| 494 | LINCO | LS SS | LS |
| 495 | LINCO | MKX 4 | MKX |
| 496 | LINCO | MKX A | MKX |
| 497 | LINCO | MKZ A | MKZ |
| 498 | LINCO | MKZ H | MKZ |
| 499 | LINCO | MKS A | MKS |
| 500 | LINCO | MKT A | MKT |
| 501 | LINCO | MKT L | MKT |
| 502 | LINCO | MKC A | MKC |
| 503 | MAZDA | SPEED PROTEGE TURBO | SPEED |
| 504 | MAZDA | SPEED MX-5 TURBO | SPEED |
| 505 | MERCE | CLK 3 | CLK |
| 506 | MERCE | CLK 4 | CLK |
| 507 | MERCE | CLK 5 | CLK |
| 508 | MERCE | CLK 6 | CLK |
| 509 | MERCE | CLS 4 | CLS |
| 510 | MERCE | CLS 5 | CLS |

| | marque | préfixe modèle initial | nouveau modèle (nom exact) |
|-----|--------|------------------------|----------------------------|
| 511 | MERCE | CLS 6 | CLS |
| 512 | MERCE | CLA 2 | CLA |
| 513 | MERCE | CLA 4 | CLA |
| 514 | MERCE | CL 50 | CL |
| 515 | MERCE | CL 60 | CL |
| 516 | MERCE | CL 55 | CL |
| 517 | MERCE | CL 65 | CL |
| 518 | MERCE | CL 63 | CL |
| 519 | MERCE | C 300 | C300 |
| 520 | MERCE | E 400 | E400 |
| 521 | MERCE | SLK55 | SLK |
| 522 | MERCE | SLK 2 | SLK |
| 523 | MERCE | SLK 3 | SLK |
| 524 | MERCE | SLK 5 | SLK |
| 525 | MERCE | SLS A | SLS |
| 526 | MERCE | SLR # | SLR |
| 527 | MERCE | SLR M | SLR |
| 528 | MERCE | SLC 3 | SLC |
| 529 | MERCE | ML350 | ML |
| 530 | MERCE | ML500 | ML |
| 531 | MERCE | ML 63 | ML |
| 532 | MERCE | ML 40 | ML |
| 533 | MERCE | ML 35 | ML |
| 534 | MERCE | ML 50 | ML |
| 535 | MERCE | ML 55 | ML |
| 536 | MERCE | ML 43 | ML |
| 537 | MERCE | ML 32 | ML |
| 538 | MERCE | R 350 | R |
| 539 | MERCE | R 500 | R |
| 540 | MERCE | R 320 | R |
| 541 | MERCE | R 63 | R |
| 542 | MERCE | R 550 | R |
| 543 | MERCE | B 200 | B200 |
| 544 | MERCE | B 250 | B250 |
| 545 | MERCE | AMG C | AMG |
| 546 | MERCE | AMG E | AMG |
| 547 | MERCE | AMG G | AMG |
| 548 | MERCE | AMG S | AMG |
| 549 | MERCE | GLC 3 | GLC |
| 550 | MERCE | GLS 4 | GLS |

| | marque | préfixe modèle initial | nouveau modèle (nom exact) |
|-----|--------|------------------------|----------------------------|
| 551 | MERCE | GLS 5 | GLS |
| 552 | MERCE | GLK 2 | GLK |
| 553 | MERCE | GLK 3 | GLK |
| 554 | MERCE | GLA 2 | GLA |
| 555 | MERCE | GLA 4 | GLA |
| 556 | MERCE | GLE 3 | GLE |
| 557 | MERCE | GLE 4 | GLE |
| 558 | MERCE | GLE 5 | GLE |
| 559 | MERCE | SL 32 | SL |
| 560 | MERCE | SL 50 | SL |
| 561 | MERCE | SL 60 | SL |
| 562 | MERCE | SL 55 | SL |
| 563 | MERCE | SL 65 | SL |
| 564 | MERCE | SL 43 | SL |
| 565 | MERCE | SL 45 | SL |
| 566 | MERCE | C 36 | C |
| 567 | MERCE | C 230 | C |
| 568 | MERCE | C 240 | C |
| 569 | MERCE | C 320 | C |
| 570 | MERCE | C 32 | C |
| 571 | MERCE | C 55 | C |
| 572 | MERCE | C 350 | C |
| 573 | MERCE | C 63 | C |
| 574 | MERCE | C 250 | C |
| 575 | MERCE | C 400 | C |
| 576 | MERCE | C 450 | C |
| 577 | MERCE | E 300 | E |
| 578 | MERCE | E 320 | E |
| 579 | MERCE | E 420 | E |
| 580 | MERCE | E 430 | E |
| 581 | MERCE | E 55 | E |
| 582 | MERCE | E 500 | E |
| 583 | MERCE | E 350 | E |
| 584 | MERCE | E 280 | E |
| 585 | MERCE | E 550 | E |
| 586 | MERCE | E 63 | E |
| 587 | MERCE | E 250 | E |
| 588 | MERCE | E 450 | E |
| 589 | MERCE | S 320 | S |
| 590 | MERCE | S 350 | S |

| | marque | préfixe modèle initial | nouveau modèle (nom exact) |
|-----|--------|------------------------|----------------------------|
| 591 | MERCE | S 420 | S |
| 592 | MERCE | S 500 | S |
| 593 | MERCE | S 600 | S |
| 594 | MERCE | S 430 | S |
| 595 | MERCE | S 55 | S |
| 596 | MERCE | S 55K | S |
| 597 | MERCE | S 65 | S |
| 598 | MERCE | S 550 | S |
| 599 | MERCE | S 450 | S |
| 600 | MERCE | S 63 | S |
| 601 | MERCE | S 400 | S |
| 602 | MERCE | S 560 | S |
| 603 | MERCE | GL 32 | GL |
| 604 | MERCE | GL 45 | GL |
| 605 | MERCE | GL 55 | GL |
| 606 | MERCE | GL 35 | GL |
| 607 | MERCE | GL 63 | GL |
| 608 | MERCE | G500 | G |
| 609 | MERCE | G55 A | G |
| 610 | MERCE | G 500 | G |
| 611 | MERCE | G 55 | G |
| 612 | MERCE | G 550 | G |
| 613 | MERCE | G 63 | G |
| 614 | MERCE | C 220 | C |
| 615 | MERCE | C 280 | C |
| 616 | MERCE | C 43 | C |
| 617 | MERCE | SL 63 | SL |
| 618 | MERCE | C | C |
| 619 | NISSA | 350 Z | 350 Z |
| 620 | NISSA | 370Z | 370Z |
| 621 | NISSA | GT-R | GT-R |
| 622 | NISSA | JUKE | JUKE |
| 623 | NISSA | 350Z | 350Z |
| 624 | NISSA | 370Z | 370Z |
| 625 | NISSA | GT-R | GT-R |
| 626 | NISSA | JUKE | JUKE |
| 627 | KIA | SOUL | SOUL |
| 628 | KIA | RIO E | RIO |
| 629 | KIA | NIRO | NIRO |
| 630 | MASER | SPIDE | SPYDE |

| | marque | préfixe modèle initial | nouveau modèle (nom exact) |
|-----|--------|------------------------|----------------------------|
| 631 | MINI | MINI | COOPE |
| 632 | HUMME | H3 4X | H3 |
| 633 | HUMME | H3T 4 | H3T |
| 634 | HUMME | H3 4W | H3 |
| 635 | MITSU | RVR 4 | RVR |
| 636 | ASTON | DB9 C | DB9 |
| 637 | ASTON | DB9 V | DB9 |
| 638 | ASTON | DB9 G | DB9 |
| 639 | ASTON | DBS # | DBS |
| 640 | ASTON | DBS S | DBS |
| 641 | ASTON | DB11 | DB11 |
| 642 | ASTON | V8 VA | V8 |
| 643 | FIAT | 124 S | 124 |
| 644 | FIAT | 500 A | 500 |
| 645 | FIAT | 500 C | 500 |
| 646 | FIAT | 500 H | 500 |
| 647 | FIAT | 500L | 500L |
| 648 | FIAT | 500X | 500X |
| 649 | RAM | 1500 | 1500 |
| 650 | GENES | G80 A | G80 |
| 651 | GENES | G70 A | G70 |
| 652 | GENES | G90 A | G90 |
| 653 | MITSU | I-MIE | IMIEV |
| 654 | NISSA | LEAF | LEAF |
| 655 | CHEVR | BOLT | BOLT |
| 656 | BMW | I3 RE | I3 |
| 657 | BMW | I3S R | I3 |
| 658 | BMW | I3 (6 | I3 |
| 659 | BMW | I3 (9 | I3 |
| 660 | BMW | I3S | I3 |
| 661 | BMW | I3 (1 | I3 |
| 662 | BMW | I3S (| I3 |
| 663 | BMW | X5 XD | X5 |
| 664 | BMW | I8 CO | I8 |
| 665 | BMW | I8 RO | I8 |
| 666 | BMW | 530E | 530 |
| 667 | BMW | 530E | 530 |
| 668 | BMW | 740E | 740 |
| 669 | BMW | 745LE | 745 |
| 670 | KIA | NIRO | NIRO |

| | marque | préfixe modèle initial | nouveau modèle (nom exact) |
|-----|--------|------------------------|----------------------------|
| 671 | KIA | SOUL | SOUL |
| 672 | HYUND | KONA | KONA |
| 673 | AUDI | A3 E- | A3 |
| 674 | CADIL | ELR (| ELR |
| 675 | CADIL | CT6 P | CT6 |
| 676 | MERCE | S 550 | S |
| 677 | MERCE | GLE 5 | GLE |
| 678 | MERCE | GLC 3 | GLC |
| 679 | FERRA | 348 S | 348 |
| 680 | FERRA | 456GT | 456 |
| 681 | FERRA | 456 G | 456 |
| 682 | FERRA | 456 M | 456 |
| 683 | FERRA | F335 | F335 |
| 684 | FERRA | F335/ | F335 |
| 685 | FERRA | 360 M | 360 |
| 686 | FERRA | 360 C | 360 |
| 687 | FERRA | 360 S | 360 |
| 688 | FERRA | 612 S | 612 |
| 689 | FERRA | F430 | F430 |
| 690 | FERRA | 599 G | 599 |
| 691 | FERRA | 550 M | F550 |
| 692 | FERRA | 575M | F575 |
| 693 | FERRA | 575 M | F575 |
| 694 | FERRA | 430 S | F430 |
| 695 | LEXUS | RC 35 | RC350 |
| 696 | LEXUS | RC 30 | RC300 |
| 697 | LEXUS | RC 20 | RC |
| 698 | LEXUS | NX 30 | NX300 |
| 699 | LEXUS | NX 20 | NX |
| 700 | LEXUS | ES300 | ES |
| 701 | LEXUS | GS300 | GS |
| 702 | LEXUS | GS400 | GS |
| 703 | LEXUS | LX450 | LX |
| 704 | LEXUS | GX 46 | GX |
| 705 | LEXUS | LS400 | LS |
| 706 | LEXUS | SC400 | SC |
| 707 | VOLVO | XC90 | XC90 |
| 708 | VOLVO | S90 T | S90 |
| 709 | VOLVO | XC60 | XC60 |
| 710 | VOLVO | S60 T | S60 |
| 711 | VOLVO | V60 T | V60 |