

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ESTIMATION DES DÉPLACEMENTS AUTOMOBILES GÉNÉRÉS PAR  
L'ARRIVÉE DES VÉHICULES AUTONOMES DANS LA RÉGION  
MÉTROPOLITAINE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE  
PRÉSENTÉ  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
MAÎTRISE EN ÉTUDES URBAINES

PAR  
MARC-OLIVIER PEPIN

MAI 2019

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL  
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.07-2011). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

## REMERCIEMENTS

Il me tient fortement à cœur de débiter mon mémoire en prenant le temps de remercier les gens qui m'ont accompagné tout au long de ce processus. Évidemment, je dois avant tout remercier mon directeur de recherche, M. Georges A. Tanguay, qui m'a guidé et dirigé de main de maître à l'aide de son expérience, ses connaissances et sa patience.

Je dois aussi remercier mon entourage. Sans eux, je n'aurais jamais eu le courage de prendre ce virage dans ma vie. Leur support aura été et sera toujours les fondements sur lesquels je me développe.

À la Madre et au Padre, votre support et vos encouragements me permettent de croire en moi et me motivent à me surpasser. Je sais à quel point vous êtes fier de moi. Sachez que tout est grâce à vous. Vous êtes la source de mon courage et le fondement de mon bonheur.

À mes amis, votre impact est plus important que vous ne pouvez l'imaginer. Les creux de vague paraissent si anodins grâce à vous. À l'inverse, vous me permettez de tirer le maximum de bonheur de chaque petit moment et pour ce, je vous en remercie infiniment. Restez massifs.

À ma copine parfaite. Un merci spécial pour ta patience, ton écoute attentive et ton amour inconditionnel. Je ne le mérite pas tous les jours, mais je remercie la vie

quotidiennement de t'avoir à mes côtés. Tu es le plus beau cadeau que la vie m'a donné.

Quand j'ai débuté la maîtrise en septembre 2016, je n'aurais jamais pu imaginer ce qu'une telle expérience pouvait m'apporter. Au-delà des connaissances académiques, au-delà des qualités de rédaction et au-delà de la rigueur au travail que j'ai pu développer au fil du processus, j'ai surtout appris des leçons qui m'ont fait grandir et qui me porteront dans un futur qui m'apparaît aujourd'hui plus simple, plus clair et plus vert. J'ai appris à relativiser les concepts et les connaissances. J'ai appris à remettre en question. J'ai appris à débattre des enjeux. Toutes ces leçons, elles m'ont été apprises grâce à l'apport inestimable de mes professeurs, de mes collègues, de mon directeur de recherche, de mes parents, de mon amoureuse, de mes amis et de mon entourage. Merci.

## AVANT-PROPOS

Ce mémoire se présente sous la forme d'un « mémoire par article ». L'article est présenté au chapitre trois dans son intégralité, tel que soumis. Étant donné la nature de l'exercice, des répétitions avec les chapitres précédents sont inévitables puisque l'article est une forme abrégée de ceux-ci. L'article a été soumis pour publication à la revue *Journal of Intelligent Transport Systems : Technology, Planning, and Operations*, et ce, en anglais.

## TABLES DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	i
AVANT-PROPOS .....	iii
LISTE DES FIGURES .....	vii
LISTE DES TABLEAUX .....	i
RÉSUMÉ .....	iii
ABSTRACT .....	iv
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE I Les véhicules autonomes.....	6
1.1 Niveau d'automatisation des VA.....	6
1.2 Impact sur le nombre de déplacements.....	10
1.2.1 Augmentation du nombre de déplacements .....	10
1.2.2 Diminution du nombre de déplacements .....	18
1.2.3 Autres effets .....	21
1.3 La question éthique.....	26
CHAPITRE II Approche méthodologique.....	29
2.1 Approche méthodologique.....	29
2.1.1 Modèle de simulation.....	30
2.1.2 Collecte de données.....	38
2.1.3 Traitement des données.....	39
2.2 Estimation du nombre de nouveaux déplacements.....	45
2.2.1 Estimation du nombre de nouveaux déplacements des 16 à 19 ans.....	45
2.2.2 Estimation du nombre de nouveaux déplacements des 20 à 64 ans.....	47
2.2.3 Estimation du nombre de nouveaux déplacements des 65 ans et plus....	50

2.3	Transfert modal des transports collectifs et actifs vers les VA .....	51
2.4	Taux d'occupation moyen des véhicules .....	56
CHAPITRE III Estimation des déplacements automobiles générés par l'arrivée des véhicules autonomes dans la région métropolitaine de Montréal .....		
3.1	Introduction.....	59
3.2	The model .....	61
3.3	Car trip model .....	62
3.4	Estimation of the number of new trips .....	68
3.4.1	Estimation of the number of new trips for 16 to 19 year-olds .....	68
3.4.2	Estimation of the number of new trips for 20 to 64 year-olds .....	70
3.4.3	Estimation of the number of new trips for 65 year-olds and over .....	73
3.5	Modal transfer of public and active transportation to AV .....	74
3.6	Average occupancy rate of automobiles.....	76
3.7	Results .....	77
3.7.1	Modal shift and change in average occupancy rate of automobiles.....	79
3.7.2	New daily trips associated with AV.....	80
3.7.3	Discussion .....	83
3.8	External costs of motorized transportation .....	85
3.9	Conclusion .....	87
CONCLUSION.....		90
ANNEXE A Détails du scénario bas .....		96
ANNEXE B Détails du scénario moyen .....		97
ANNEXE C Détails du scénario élevé.....		98
ANNEXE D Nombre de titulaires d'un permis de conduire ou d'un permis probatoire selon l'âge et les régions administratives .....		99

ANNEXE E Nombre de titulaires d'un permis de conduire, population et  
pourcentage de détentions dans la RMR de Montréal selon l'âge ..... 100

RÉFÉRENCES..... 101



## LISTE DES FIGURES

Figure	Page
2.1 Illustration du pourcentage de la population avec permis de conduire par catégorie d'âge pour la RMR de Montréal, 2013 .....	43
2.2 Taux de détention de permis de conduire des trois scénarios vs situation actuelle .....	50
3.1 Driver's license by age category according to the scenarios .....	72
3.2 Variations in car trips of various modal shift scenarios in a medium scenario .....	80
3.3 Percentage of new trips per day by age group - Medium scenario.....	81

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
1.1 Niveaux d'automatisation des VA .....	7
2.2 Scénarios associés au transfert modal.....	33
2.3 Description des variables.....	37
2.4 Déplacements et parts modales dans la région métropolitaine de Montréal en 2016.....	39
2.5 Nombre de permis de conduire et taux de détention par catégorie d'âge....	42
2.6 Taux de détention et variation du nombre de permis de conduire par catégorie d'âge selon les scénarios.....	49
3.1 Modal shift scenarios.....	64
3.2 Description of variables.....	67
3.3 Detention rates and variations in the number of drivers licenses by age category according to the scenarios.....	72
3.4 Summary of modal shifts studies considered .....	75
3.5 Percentage of variation in motorized trips in a medium AV scenario.....	78
3.6 Percentage change in motorized trips in a low AV scenario .....	78

3.7	Percentage change in motorized trips in a high VA scenario .....	79
3.8	External costs of motorized transportation (in billions of dollars, unless stated otherwise) .....	86

## RÉSUMÉ

Depuis une dizaine d'années, l'industrie automobile évolue rapidement vers des véhicules de plus en plus autonomes. Ceux-ci peuvent changer radicalement la mobilité d'une portion importante de la population et offrir des solutions potentielles aux problèmes de transport actuels.

L'arrivée à grande échelle des véhicules autonomes (VA) peut diminuer les coûts de déplacement et, conséquemment, faciliter et améliorer l'efficacité des déplacements automobiles. Par ailleurs, certains effets, comme une hausse des déplacements, demeurent à identifier et pourraient tout autant s'avérer néfastes en matière de mobilité de la population. C'est dans ce contexte que la présente recherche vise à établir une estimation du nombre de déplacements générés par l'arrivée des VA à Montréal à l'aide d'un modèle de simulation. La recherche se veut une application de la méthodologie de Truong *et al.* (2017) dans le contexte québécois. Les auteurs ont développé une méthode pour estimer les nouveaux déplacements associés aux VA en mesurant les écarts dans les besoins de déplacement selon les différentes catégories d'âge.

La moyenne du pourcentage d'augmentation des déplacements motorisés de l'ensemble des résultats produits est de 13 %. Si l'arrivée des VA ne change pas le taux d'occupation moyen actuel des voitures, nos résultats prédisent une augmentation des déplacements de 16 % à 20 % selon le scénario moyen. Autrement, l'augmentation prédite des déplacements se situe entre 2 %, selon une augmentation de 14 % du taux d'occupation, et 26 %, selon une diminution de 5 % du taux d'occupation. Pour chacun des scénarios évalués dans notre analyse, nous estimons sommairement certains des effets sur les coûts externes causés par les déplacements en automobile. Selon nos résultats, les VA pourraient réduire les coûts privés et sociaux de 5 059 milliards de dollars au Québec, soit une diminution de 30 % par rapport aux estimations de 2008 de Transport Canada. Notre recherche contribue ainsi à la réflexion des planificateurs et des décideurs afin de maintenir des plans régionaux opportuns et éclairés en fonction d'une éventuelle hausse du nombre de VA.

Mots clés : Véhicules autonomes, déplacements motorisés, âge, coûts externes.

## ABSTRACT

Numerous recent studies predict that the large-scale arrival of autonomous vehicles (AV) will lead to a reduction in travel costs and, consequently, facilitate and improve motorists' movements (Wadud *et al.*, 2016). On the other hand, some effects remain to be identified and could have a negative impact on general mobility. In light of these potential effects, the main objective of the present research is to estimate the number of trips generated by the arrival of AV in the Montreal metropolitan area.

Our research methodology is based on the simulation model developed by Truong *et al.* (2017), which estimates new travel demand associated with AV by measuring differences in travel needs by age categories. Given the uncertainty regarding the evolution of critical variables such as future car occupancy rate, we evaluate different scenarios to assess a range of potential effects of VA on motorized travel.

The average percentage change in motorized travel of all the produced results is 13%. If the arrival of AV does not offset the current average car occupancy rate, our results predict an increase in trips of 16% to 20%. Otherwise, the increase is estimated between 2%, based on a 14% increase in the occupancy rate, and 26%, based on a 5% decrease in the occupancy rate.

For each scenario, we briefly estimate the effects on external costs caused by automobile trips. According to our results, AV could reduce private and social costs by \$5 059 billion, a 30% decrease from 2008 Transport Canada's estimates. Our research thus contributes to the reflection of planners and decision-makers in order to maintain timely and informed regional plans in response to a possible increase in the number of AV.

**Keywords :** Autonomous cars, driverless, self-driving, motorized travel, age, externalities.

## INTRODUCTION

Le présent mémoire par article aborde le thème des effets des véhicules autonomes (VA) pour le cas de la région métropolitaine de Montréal. Il vise à établir une estimation du nombre de déplacements générés par l'arrivée des VA à l'aide d'un modèle de simulation.

Depuis une dizaine d'années, l'industrie automobile évolue rapidement vers des véhicules de plus en plus autonomes qui peuvent changer radicalement la mobilité d'une portion importante de la population et offrir des solutions potentielles aux problèmes de transport actuels. On retrouve déjà des voitures dites « semi-autonomes » avec des systèmes d'avertissement de collision, des régulateurs de vitesse adaptatifs, des systèmes de maintien des voies et des technologies de stationnement automatisé (Anderson *et al.*, 2014) et les VA sont actuellement utilisés pour des usages industriels. En guise d'exemple, l'entreprise pétrolière *Suncor* utilise des camions à benne autonomes sur des sites miniers dans le Nord canadien (Uhlemann, 2015).

La croissance en popularité et la modernisation des systèmes avancés d'assistance à la conduite pavent la voie à l'autonomisation de plus en plus complète des transports. Des fonctions telles que le régulateur de vitesse adaptatif (2006), l'assistance au stationnement parallèle (2006), le freinage d'urgence automatique (2008) et les capteurs qui gardent les voitures dans leur voie de circulation (2014) ont été progressivement introduites (Mosquet *et al.*, 2015).

Plusieurs constructeurs ont aussi indiqué qu'ils entendent produire des VA d'ici 2020-2025 (Gill *et al.*, 2015) et on prévoit maintenant leur arrivée sur le marché de l'automobile d'ici 10 à 15 ans (Anderson *et al.*, 2014 ; Litman, 2014 ; Mosquet *et al.*, 2015). Par exemple, Trommer *et al.* (2016) prévoient que d'ici 2035 la proportion de VA pourrait atteindre entre 17 % et 42 % en Allemagne et entre 11 % et 32 % aux États-Unis. Les scénarios envisagés par le *Boston Consulting Group* (Mosquet *et al.*, 2015) prévoient, selon différentes hypothèses, un taux de pénétration global des VA sur le marché de 10 % à 19 % d'ici 2035 et 20 % à 43 % d'ici 2040, tandis que les résultats de Bansal et Kockelman (2017) prédisent un taux de pénétration entre 25 % et 87 % d'ici 2045 si l'on suppose respectivement une baisse annuelle des prix de 5 % à 10 % et une volonté à payer constante des automobilistes à partir des valeurs de 2015.

La flotte de VA de Google a déjà parcouru plus de six millions de kilomètres sur les routes aux États-Unis et leurs véhicules ont commencé à rouler sur les routes publiques sans que personne ne soit assis à l'intérieur (Google, 2018). Une flotte de taxi entièrement automatisé opéré par Uber a aussi été réintroduite dans les rues de Pittsburgh depuis décembre 2018, après avoir travaillé à renforcer la sécurité et la performance du système automatisé pendant environ un an (Uber, 2018). Par ailleurs, l'entreprise opère aussi des taxis partiellement automatisés, à San Francisco et Toronto (Uber, 2018) et prévoit acheter jusqu'à 24 000 voitures entièrement automatisées dans le cadre d'un accord non exclusif avec le constructeur Volvo de 2019 à 2021 (Gibbs, 2017).

En mars 2016, le département des Transports des États-Unis (NHTSA, 2016) a annoncé une entente avec les constructeurs automobiles exigeant que plus de 99 %

des véhicules neufs soient dotés de freinage d'urgence automatique d'ici 2022. De plus, la *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) a indiqué à Google, en réponse à une demande de la part de l'entreprise, qu'un système informatique opérant un VA pouvait être considéré comme un conducteur (Shepardson et Lienert, 2016). Cette subtilité peut clarifier plusieurs règlements en faveur des VA et faciliter leur arrivée sur les routes. Trommer *et al.* (2016) ont, pour leur part, analysé le cadre juridique et réglementaire aux États-Unis, en Allemagne et en Chine, et ont constaté que les organismes de réglementation travaillent actuellement à l'adaptation du cadre juridique afin d'ouvrir la voie à cette innovation.

Un système de transport urbain bien conçu, basé sur des véhicules totalement autonomes, pourrait présenter de nombreux avantages. Un tel système pourrait par exemple sauver des milliers de vies chaque année, libérer des milliards de dollars dépensés pour soigner les victimes d'accidents de la route et, conséquemment, réduire le coût des assurances (Arbib et Seba, 2017; Cavoli *et al.*, 2017; Davidson et Spinoulas, 2015; Lange *et al.*, 2017). Il serait possible de diminuer le nombre d'accidents grâce aux technologies innovantes présentes dans les VA qui contribuent à une meilleure perception de l'environnement, à une meilleure planification des déplacements, à l'identification et à l'évitement des obstacles en mouvement, ainsi qu'aux systèmes de stationnement et freinage automatiques (Milakis *et al.*, 2017). L'intelligence artificielle est devenue cruciale pour permettre des jugements rapides et en temps réel dans des contextes de transport complexes (Clements et Kockelman, 2017). Pour comprendre et reconstruire leur environnement, et pour se comporter de manière efficace et sécuritaire sur les routes, les VA comptent aujourd'hui sur les systèmes de télédétection par laser (*Light Detection and Ranging, LiDAR*), le robot



mobile, les capteurs de vitesse de roue et autres types de capteurs et la communication sans fil intervéhiculaire (Ville de Montréal, 2017 ; Lange *et al.*, 2017).

L'usage des VA pourrait surpasser celle de l'automobile individuelle et accroître la mobilité des individus actuellement incapables de conduire. L'apparition des VA aurait aussi le potentiel de réduire la congestion urbaine, le nombre de voies autoroutières, la consommation de pétrole, le temps d'attente aux intersections, le temps de recherche de stationnements et le nombre de stationnements nécessaires tout en augmentant le confort des déplacements et l'aisance à planifier et prédire la durée de ses déplacements (Folsom, 2011 ; Heinrichs et Cyganski, 2015). Selon Litman (2017), la plupart de ces impacts apparaîtront seulement lorsque les VA deviendront courants et abordables, soit probablement entre 2040 et 2060.

C'est dans ce contexte que le présent mémoire vise à établir une estimation du nombre de déplacements générés par l'arrivée des VA à l'aide d'un modèle de simulation qui sera défini et expliqué dans les prochaines sections. Notre objectif n'est pas de prédire avec précision les effets futurs des VA, mais plutôt d'évaluer une gamme d'effets potentiels sur les déplacements motorisés. Ainsi, la principale question de recherche est la suivante :

*Quel sera l'effet de l'adoption des VA sur le nombre de déplacements automobiles dans la région métropolitaine de Montréal ?*

Dans le premier chapitre, nous discutons des différents niveaux d'automatisation des VA, ainsi que des deux écoles de pensées qui s'affrontent au sujet des effets générés par l'arrivée des VA à l'aide d'une revue de littérature sur le sujet. Les effets généraux

des VA qui entraînent une augmentation des déplacements seront ainsi définis dans cette section de la recherche. Dans le chapitre 2, nous présentons notre modèle de simulation des déplacements et l'approche méthodologique utilisée. Ce chapitre nous permettra de développer les variables de notre modèle. La troisième partie présentera notre article, comprenant notre approche méthodologique, les résultats de nos calculs, et une discussion des résultats. L'article porte sur l'impact de l'arrivée des VA dans la région métropolitaine de Montréal et se divise en trois parties. Premièrement, nous présentons un cadre théorique sur les VA. Le cadre comprend les différents niveaux d'automatisation des VA, ainsi qu'une revue de littérature exposant les effets possibles, autant ceux positifs, négatifs, directs et indirects, découlant d'un accroissement de leur présence. Deuxièmement, nous développons le modèle de simulation des déplacements utilisé pour estimer les nouveaux déplacements motorisés associés aux VA. Nous utilisons ici les écarts dans les besoins de déplacement selon les différentes catégories d'âge. La troisième et dernière partie de l'article expose l'ensemble des résultats et présente une discussion de ceux-ci. Nos résultats prédisent entre autres une augmentation moyenne des déplacements motorisés de 13 % selon l'ensemble des résultats et une augmentation des déplacements de 16 % à 20 % selon un taux d'occupation moyen des véhicules stable au fil des années. Les scénarios seront présentés et détaillés dans cette section de l'article. Par ailleurs, il est important de noter qu'étant donné que l'article est présenté dans son intégralité, des éléments de ce chapitre sont repris dans d'autres sections du mémoire. Finalement, un résumé, des remarques finales et des perspectives de recherches constitueront la dernière section du présent mémoire.

## CHAPITRE I

### LES VÉHICULES AUTONOMES

Dans ce chapitre, nous présentons les différents niveaux d'automatisation des VA, ainsi que les deux écoles de pensées qui s'affrontent au sujet des effets générés par l'arrivée des VA à l'aide d'une revue de littérature sur le sujet.

#### 1.1 Niveau d'automatisation des VA

En fonction des différents niveaux possibles d'automatisation associés aux technologies et aux implications humaines, différentes définitions d'automation ont été proposées. La littérature entourant les niveaux d'automatisation utilise notamment et couramment les définitions de Gasser et Westhoff (2012), NHTSA (2013), et Smith (2013).

Dans la même veine que les travaux de Kyriakidis *et al.* (2015), nous avons résumé ces définitions sous forme d'un tableau sommaire (tableau 1.1). Nous avons ainsi utilisé les définitions des auteurs pour établir une classification sommaire propre à notre recherche. En procédant ainsi, il nous est possible d'extraire les informations fondamentales et de combiner l'essentiel de chaque définition.

**Tableau 1.1 — Niveaux d'automatisation des VA**

Source	Niveaux d'automatisation des VA					
	0	1	2	3	4	5
NHTSA (2013)	Aucune aut.	Aut. spécifique à une fonction	Aut. de fonctions combinées	Aut. avec conduite limitée	Aut. complète	
Gasser et Westhoff (2012)	Conducteur seulement	Assisté	Partiellement automatisé	Hautement automatisé	Entièrement automatisé	
Smith (2013)	Le conducteur surveille l'environnement de conduite			Le système surveille l'environnement de conduite		
	Aucune aut.	Aide à la conduite	Automatisati on partielle	Aut. conditionnelle	Haute aut.	Aut. complète
Sommaire	Aucune aut.	Assistance à la conduite	Aut. partielle	Aut. conditionnelle	Aut. complète avec interventions	Aut. complète sans intervention

Note : Aut. : automatisation.

Sources : Gasser et Westhoff, 2012 ; NHTSA, 2013 ; Smith, 2013

### 1.1.1 Classification sommaire

La classification sommaire des niveaux d'automatisation des VA découle des définitions de Gasser et Westhoff (2012), NHTSA (2013) et Smith (2013).

#### Niveau 0 — aucune automatisation

Le conducteur a le contrôle complet des commandes principales du véhicule (freins, direction et accélération) en tout temps, et il est seul responsable de surveiller la chaussée. Ce niveau inclut les véhicules équipés de certains systèmes d'aide à la conduite qui n'ont pas le contrôle de la direction, du freinage ou de l'accélération.

#### Niveau 1 — Assistance à la conduite

Le conducteur dispose d'un contrôle global et est seul responsable de la sécurité de l'exploitation, mais la voiture peut disposer d'une autorité limitée sur une commande primaire (ex. : régulateur de vitesse, freinage automatique).

#### Niveau 2 — Automatisation partielle

Automatisation d'au moins deux fonctions de commande primaires conçues pour fonctionner à l'unisson afin de soulager le conducteur du contrôle de ces fonctions. Le conducteur est toujours responsable de la surveillance de la chaussée et de l'exploitation en toute sécurité et devrait être disponible pour le contrôle en tout temps et à court préavis.

#### Niveau 3 — Automatisation conditionnelle

Le système contrôle le freinage, l'accélération et la direction. Le conducteur n'a pas à s'assurer du bon fonctionnement du système et de la sécurité du trajet. Si nécessaire, le conducteur peut être appelé à prendre le contrôle, mais avec un temps de transition suffisamment long.

#### Niveau 4 — Automatisation complète avec interventions possibles

Le système contrôle le freinage, l'accélération et la direction. Le conducteur n'a pas à s'assurer du bon fonctionnement du système et de la sécurité du trajet. Les systèmes peuvent demander au conducteur de prendre le relais après un délai suffisamment long, mais en l'absence d'une prise de contrôle, le système reviendra par lui-même à la condition de risque minimal<sup>1</sup>.

#### Niveau 5 — Automatisation complète sans interventions possibles

Le système contrôle le freinage, l'accélération et la direction sous toutes les conditions routières et environnementales gérables par un conducteur humain. De cette manière, les conducteurs ne doivent pas nécessairement être titulaires d'un permis ou avoir les capacités physiques et cognitives pour conduire.

Comme nous le verrons plus loin, l'objectif de la recherche est d'établir une estimation du nombre de déplacements générés par l'arrivée des VA selon une automatisation de niveau 5 à l'aide d'un modèle de simulation qui sera défini et expliqué dans les prochaines sections.

---

<sup>1</sup> Cette définition nous porte à croire que les conducteurs, à ce niveau, devraient tout de même posséder un permis de conduire valide et avoir les capacités physiques et cognitives pour conduire.

## 1.2 Impact sur le nombre de déplacements

Les effets sur le nombre de déplacements générés par les VA ne font pas l'unanimité dans les milieux professionnels et académiques. De manière globale, les articles scientifiques pointent malgré tout vers une augmentation du nombre de déplacements. Nous présentons dans la section 1.2 les deux écoles de pensée qui s'affrontent au sujet du nombre de kilomètres parcourus par les véhicules qui résulterait d'un système de transport basé autour des VA.

### 1.2.1 Augmentation du nombre de déplacements

La première école met l'accent sur le potentiel de cette technologie d'augmenter le nombre de déplacements étant donné une diminution des coûts de déplacements et une plus grande facilité à se déplacer. Plusieurs facteurs risquent d'engendrer une diminution des coûts de déplacement et, conséquemment, faciliter et améliorer les déplacements des automobilistes.

#### 1.2.1.1 Valeur du temps

Puisqu'ils n'auront plus à conduire, les occupants du véhicule seraient libres de se livrer à d'autres activités pendant le voyage. Les véhicules hautement automatisés peuvent en fait permettre une utilisation productive du temps passé à bord des véhicules. Par conséquent, le coût du temps de déplacement d'un automobiliste peut être considérablement réduit à un niveau inférieur au coût du temps de déplacement des navetteurs utilisant d'autres modes de transport (Wadud *et al.*, 2016). En ce sens, un sondage auprès de plus de 5 000 individus dans 40 pays révèle une augmentation substantielle du nombre de personnes qui ont l'intention de se reposer ou dormir, de regarder des films ou de lire, tout se déplaçant en mode entièrement automatisé par

rapport aux autres modes de conduite, soit manuel, partiellement automatisé et hautement automatisé (Kyriakidis *et al.*, 2015). De plus, un sondage auprès de 2 000 résidents de la ville de Berkeley en Californie démontre que, parmi les avantages potentiels des VA, les répondants sont davantage attirés par le caractère sécuritaire et la liberté de se livrer à d'autres activités durant le trajet (Howard et Dai, 2014).

Les résultats d'un sondage récent sur les préférences des navetteurs aux Pays-Bas indiquent toutefois que les automobilistes ne valorisent pas encore ces avantages. Le coût du temps de déplacement à bord des VA pourrait donc être plus élevé qu'anticipé puisque certains automobilistes redoutent le fait d'être à bord d'un véhicule sans conducteur et n'ont aucune expérience réelle du déplacement dans un VA (Yap *et al.*, 2016). Bien sûr, les effets à long terme peuvent être différents lorsque les utilisateurs de ce type de véhicules se seront habitués à de tels déplacements. Un autre sondage en ligne effectué en septembre 2014 en Chine, en Inde, aux États-Unis, au Royaume-Uni et en Australie auprès de 1 722 individus confirme la crainte des automobilistes vis-à-vis l'automatisation des véhicules. En effet, lorsque questionnés par rapport aux activités qu'ils souhaiteraient réaliser dans un véhicule entièrement autonome, la plupart des répondants, soit entre 30,7 % et 44 % selon la région, ont indiqué qu'ils préféreraient tout de même superviser la route (Schoettle et Sivak, 2014). Il est donc probable que les effets sur la valeur du temps à bord d'un VA se feront sentir seulement après une période d'adaptation qui confirmerait ou infirmerait le caractère sécuritaire de cette technologie.

#### 1.2.1.2 Confort

Il est possible que les VA améliorent le confort en permettant d'éviter les dépassements et les changements de voie dangereux, de maintenir une vitesse



constante, et de réduire la fréquence et l'intensité des accélérations et des freinages (Dang *et al.*, 2015). Les technologies de régulateur de vitesse (*Cruise Control*) font partie des premiers systèmes automatisés qui ont permis d'améliorer le confort lors de la conduite. Le régulateur de vitesse adaptatif coopératif (*Cooperative Adaptive Cruise Control*) est par la suite apparu pour accroître une fois de plus le confort en soulageant le conducteur de la nécessité d'ajuster continuellement sa vitesse en fonction de celle du véhicule qu'il précède (Van Arem *et al.*, 2006). La communication sans fil intervéhiculaire peut faire progresser le développement des systèmes avancés d'aide à la conduite en fournissant au système des renseignements plus complets et plus fiables sur les véhicules à proximité (Milanés *et al.*, 2014). Grâce à ce type d'information, le système automatisé sera en mesure de mieux anticiper les problèmes potentiels, ce qui se traduira par une conduite plus sécuritaire et plus naturelle.

#### 1.2.1.3 Efficacité de la circulation

Les types de technologie associés aux VA peuvent aussi permettre d'améliorer l'efficacité de la circulation et diminuer l'utilisation de carburant. En matière d'efficacité de la circulation, les régulateurs de vitesse adaptatifs coopératifs permettent de réduire les temps de déplacement en augmentant significativement les débits de circulation et les vitesses de déplacement à mesure que le taux de pénétration des régulateurs augmente. Les effets seraient significatifs à partir d'un taux de pénétration de 40 % (Arnaout et Arnaout 2014). Talebpour et Mahmassani (2016) démontrent qu'une augmentation du taux de pénétration des véhicules connectés sur le marché automobile améliore la stabilité du flux de circulation et augmente le seuil de vitesse à partir duquel le trafic devient instable. De plus, selon eux, l'automatisation est plus efficace que la seule connectivité intervéhiculaire pour

empêcher un déséquilibre du flux de circulation. Avec un taux de pénétration de 100 %, les résultats démontrent que le temps d'attente aux intersections serait diminué de 20 % selon un système de limite de vitesse variable (Khondaker et Kattan, 2015) et de 90 % selon un système de régulateur de vitesse adaptatif coopératif entre les véhicules (Zohdy et Rakha, 2016).

Puisque les comportements des automobilistes peuvent déstabiliser le flux de véhicules sur la route et le trafic routier, Cui *et al.* (2017) estiment qu'un seul VA pourrait arriver à stabiliser, dans des conditions optimales, entre 20 et 40 véhicules. Une circulation stable coïncide généralement avec une diminution du trafic et de la consommation des véhicules puisque la constance généralisée du comportement des automobilistes permet un effet synergique entre ceux-ci. Ainsi, une croissance des VA sur les routes se traduirait potentiellement par une stabilisation de la circulation routière, engendrant une diminution des temps de déplacement.

#### 1.2.1.4 Capacité des routes

En outre, cette nouvelle technologie pourrait aussi stimuler les déplacements en augmentant la capacité des routes, car les voies pourraient être plus étroites et les voitures plus proches les unes des autres (Millard-Ball, 2016). Childress *et al.* (2015) estiment que la capacité des routes pourrait être jusqu'à 30 % supérieur selon un système de transport urbain basé sur les VA.

Un avantage important sera la réduction de la distance entre les voitures, étant donné que les VA ont le potentiel d'assurer que les véhicules se suivent de près de manière plus sécuritaire qu'auparavant. Le maintien d'un espacement de sécurité entre les véhicules exige un contrôle serré de chaque véhicule et, sans les VA, signifie que

l'augmentation de la vitesse implique une hausse de l'espace. Fernandes et Nunes (2012) évaluent que la capacité des routes pourrait croître de 55 à 183 véhicules par kilomètre en ville et de 36 à 183 véhicules par kilomètre sur l'autoroute en augmentant le nombre de véhicules circulant par peloton d'un (conduite non autonome) à vingt. Les auteurs précisent toutefois qu'une capacité de 131 véhicules par kilomètre (peloton de huit véhicules) serait préférable pour maximiser le gain de capacité en minimisant la taille du peloton. Cela permettra une meilleure utilisation des infrastructures et une conduite aérodynamique puisque les véhicules à l'arrière font face à une résistance moindre, ce qui permettra simultanément d'augmenter l'efficacité de la circulation, de réduire significativement la consommation de carburant et les émissions de GES. Conséquemment, l'optimisation de la capacité des routes stimulerait les déplacements.

#### 1.2.1.5 Mobilité

Les VA pourraient de plus permettre aux jeunes, aux personnes âgées et aux personnes handicapées de voyager plus facilement en voiture individuelle (Fagnant et Kockelman, 2015) et d'ainsi augmenter la quantité d'automobilistes potentiels. La conduite autonome pourrait leur donner de l'autonomie dans leur mobilité, faciliter l'accès aux services essentiels et réduire la probabilité d'isolement social (Trommer *et al.*, 2016).

Brown *et al.* (2014) estiment que dans l'éventualité où chaque segment de la population de 16 à 85 ans voyagerait autant que le décile supérieur, les déplacements pourraient croître jusqu'à 40 %. Plus précisément, le cabinet comptable KPMG (2015) prédit que les jeunes de 16 à 24 ans pourraient accroître leurs déplacements de 20 % d'ici 2050, les 55 à 64 ans de 9 %, les 65 à 74 ans de 51 %, les 75 à 84 ans de 28 % et

les 85 ans et plus de 28 %. Les auteurs du rapport estiment que les déplacements effectués par la population active entre 25 et 54 ans demeureraient au même niveau entre 2014 et 2050. Au total, la somme de la hausse des déplacements de la population de 16 ans et plus représente 18 990 kilomètres parcourus par habitant annuellement, dont 43 % pourraient provenir du segment des 65 à 74 ans. En ce sens, Harper *et al.* (2016) ont estimé la variation des kilomètres parcourus selon l'augmentation de la mobilité des jeunes, des personnes âgées et des conducteurs avec conditions médicales. Les auteurs ont divisé cette augmentation en trois segments :

- 1- Les non-conducteurs commenceront à se déplacer autant que les conducteurs de chaque groupe d'âge,
- 2- Les jeunes retraités (65 à 74 ans) sans condition médicale pouvant affecter leur habilité à conduire voyageraient autant que la population active (19 à 64 ans). De plus, les retraités plus âgés (75 ans et plus) voyageraient autant qu'une personne de 65 ans dans les conditions actuelles.
- 3- Les individus de la population active qui ont une condition médicale pouvant affecter leur habilité à conduire voyageront autant que ceux qui n'ont pas condition médicale.

Ainsi, les non-conducteurs de 19 ans et plus (segment 1) pourraient augmenter les kilomètres parcourus en automobile de 9 %, tandis que les conducteurs âgés (segment 2) et les personnes ayant des problèmes médicaux (segment 3) pourraient augmenter les déplacements de 2,2 % et 2,6 % respectivement.

#### 1.2.1.6 Étalement urbain

Les nombreux facteurs décrits plus tôt permettent de réduire les coûts de transport et, selon plusieurs chercheurs, augmenteraient ainsi l'étalement urbain (Anderson *et al.*, 2014 ; Cavoli *et al.*, 2017 ; Milakis *et al.*, 2017 ; Millard-Ball, 2016 ; Smith, 2012 ; Tanguay et Gingras, 2011 ; Young *et al.*, 2016 ; Zakharenko, 2016). En effet, les progrès technologiques et les investissements dans les infrastructures de transport rendraient les transports plus rapides et moins coûteux, ce qui a amené les ménages à choisir de vivre dans des régions éloignées où les prix des terrains sont bas (De Vos et Witlox, 2013). Selon Hanson (2004), la distance de navettage parcourue quotidiennement par les automobilistes n'a cessé d'augmenter à mesure que les technologies de transport se sont améliorées. Dans ces conditions, il est probable que les ménages qui utilisent un VA choisissent de vivre dans des zones où le prix des maisons est plus bas, mais plus loin du centre-ville, car les avantages de ce type de véhicule pourraient compenser pour certains des inconvénients associés à l'éloignement (Heinrichs et Cyganski, 2015).

Ces zones éloignées du centre se caractérisent par leur dépendance à l'automobile, ce qui contribue à augmenter la pollution de l'air, menacer la santé respiratoire et augmenter le risque de blessures chez les conducteurs, les passagers et les piétons (Freund et Martin, 2009). Au Québec, l'étalement urbain est causé principalement par la valeur inférieure des terrains en périphérie des centres-villes, par l'importance des infrastructures routières québécoises, par la croissance de la population et des revenus, par la séparation des fonctions urbaines et par le faible coût individuel de l'utilisation des infrastructures et des transports (Vivre en Ville, s.d. ; Brueckner, 2001 ; Habibi et Asadi, 2011). En conséquence, les banlieues développées présentent des taux de densité faibles et se retrouvent de plus en plus loin des centres d'emplois. Ce

problème pourrait mener finalement à une croissance de la congestion, des distances parcourues et des coûts d'infrastructure et à une réduction de la qualité de l'environnement et des interactions sociales (Habibi et Asadi, 2011).

En ce sens, la recherche de Bart (2010) illustre une élasticité positive élevée entre l'étalement urbain et les émissions de CO<sub>2</sub> du transport. Cette corrélation est beaucoup plus forte que pour les autres facteurs examinés, soit la croissance démographique et la croissance du PIB par habitant. L'élasticité de la variable liée à l'étalement urbain est de 1,6, ce qui signifie qu'une augmentation de 1 % des zones périphériques entraîne une augmentation de 1,6 % des émissions de CO<sub>2</sub> dues aux transports (Bart, 2010).

Une étude de cas portant sur la ville de Madrid démontre que l'étalement urbain est lié à un modèle de mobilité non durable, qui augmente le nombre de navetteurs sur les routes, les distances et l'utilisation de la voiture en général (Garcia-Palomares, 2010). Les transports collectifs (TC) semblent aussi être fortement influencés en matière d'efficacité et de compétitivité par la dispersion des zones urbaines. En effet, plus le développement est dispersé, plus son niveau d'efficacité et de compétitivité est faible et, conséquemment, sa part modale y est généralement faible (Camagni *et al.*, 2002).

Les taux d'émissions de gaz à effet de serre (GES) du transport par habitant en 2006 (en tonne d'équivalent CO<sub>2</sub> par habitant) selon les secteurs nous renseignent sur l'influence de la dépendance automobile sur les émissions polluantes. En effet, les couronnes nord et sud de Montréal présentent des taux d'émissions supérieurs de 38 % et 47 % comparativement à l'agglomération de Montréal. Laval et l'agglomération de

Longueuil présentent pour leur part des taux supérieurs de 25 % et 9 % (AECOM, 2010). L'éloignement se traduit donc par une forte augmentation des émissions polluantes par habitant. Par exemple, pour chaque kilomètre d'éloignement, un édifice de bureaux majore le déplacement moyen de ses usagers de 250 mètres et donc de 0,0475 kilogramme d'équivalent CO<sub>2</sub> par navetteur (Vivre en Ville, s.d.).

Évidemment, il existe une différence entre les variations du nombre de déplacements et les variations des kilomètres parcourus. Nous nous concentrons sur le nombre de déplacements puisque les kilomètres parcourus dépendent d'un nombre important de facteurs incertains et difficiles à estimer dans le cadre du présent mémoire comme la localisation des ménages selon les niveaux d'automatisation.

### 1.2.2 Diminution du nombre de déplacements

La deuxième école de pensée met l'accent sur le potentiel des VA de réduire les déplacements automobiles. Cela pourrait par exemple provenir en partie de l'abandon de la voiture à propriétaire unique au profit des voitures partagées.

#### 1.2.2.1 L'autopartage

L'autopartage est un service qui permet aux membres d'avoir accès à un parc de véhicules garés à divers endroits dans les quartiers, aux stations de transport en commun, dans les centres d'emploi et sur les campus collégiaux et universitaires (Porter *et al.*, 2013). Certains auteurs affirment que l'évolution des technologies de conduite autonome pourrait se traduire par un plus grand partage des véhicules, y compris des taxis autonomes et un plus grand nombre de covoiturages en véhicule privé (International Transport Forum, 2015 ; Fagnant et Kockelman, 2016 ; Arbib et Seba, 2017). En remplaçant les coûts fixes élevés de la possession d'une voiture et les

coûts faibles d'opération au quotidien par des frais basés sur le temps et le kilométrage pour l'accès à des véhicules partagés et autonomes, le coût marginal de chaque trajet en voiture augmenterait et, conséquemment, les déplacements en véhicule diminueraient (Millard-Ball, 2016). En ce sens, Litman (2017) a estimé les coûts fixes de possession d'une voiture à 4 000 \$ annuellement et les coûts d'opération à 0,125 \$ par kilomètre (0,2 \$ par mille), ce qui encouragerait actuellement les déplacements étant donné leur faible coût marginal. L'autopartage peut réduire la consommation d'énergie et les émissions de GES en permettant aux ménages de posséder moins de véhicules sans perdre l'option d'y avoir accès au besoin. De cette manière, la diminution des déplacements et, indirectement, du nombre de véhicules vendus conduit à une baisse des émissions polluantes. En contrepartie, ce système peut accroître les émissions de GES pour les ménages possédant actuellement entre zéro et un véhicule<sup>2</sup> en augmentant leur accès aux automobiles (Porter *et al.*, 2013).

D'autre part, selon l'école de pensée de l'autopartage, les VA ont le potentiel de diminuer le nombre de stationnements nécessaires, ce qui peut être particulièrement utile dans les territoires où l'espace est restreint. Ceci permettrait un développement et une utilisation plus dense des terrains de stationnement, une densification des activités économiques au centre-ville et réduirait les déplacements pour la recherche de stationnement (Millard-Ball, 2016 ; Zakharenko, 2016). En ce sens, une étude de cas pour la ville de Lisbonne au Portugal illustre comment les VA pourraient

---

<sup>2</sup> Par exemple, un ménage de trois personnes possédant un véhicule présente un taux de possession d'un tiers de véhicule.



influencer les besoins de stationnement vu leur capacité à se déplacer sans conducteur. Après chaque voyage, le véhicule passe au voyageur suivant ou se repositionne à un endroit où le stationnement s'avère moins coûteux. Les auteurs évaluent ainsi qu'un scénario de niveau cinq pourrait entraîner une diminution du besoin de stationnement sur rue de 20 % et une diminution pouvant atteindre 80 % pour les espaces de stationnement hors rue (International Transport Forum, 2015). Zhang *et al.* (2015) indiquent pour leur part qu'une diminution pouvant atteindre 90 % du nombre de stationnements requis est possible dans un contexte de VA et selon une utilisation plus répandue de l'autopartage. Selon une autre étude, environ 97 % de la demande quotidienne de stationnement pourrait se déplacer vers une zone de stationnement dédiée en périphérie du centre-ville (Zakharenko, 2016). Il est tout de même important de noter que dans l'éventualité où les voyages sans conducteur ne seraient pas autorisés, la demande de stationnement des véhicules demeurerait concentrée dans les centres-villes (Zhang *et al.*, 2015).

De nombreuses raisons pourraient toutefois expliquer une préférence de la part des automobilistes pour les voitures à propriétaire unique : pour le statut social, pour bénéficier d'un espace de rangement en continu, pour se déplacer sans contraintes, pour parcourir de longues distances ou simplement pour avoir la liberté d'effectuer de nombreux trajets (Litman, 2017). Ainsi, notre modèle assumera que le système de transport urbain n'est pas basé sur l'autopartage à grande échelle, comme c'est d'ailleurs le cas en ce moment.

#### 1.2.2.2 Stationnement

Les VA ont le potentiel de diminuer le nombre de déplacements grâce à l'amélioration de la capacité de localiser avec précision les espaces de stationnement

et d'ainsi diminuer la recherche de places disponibles. Selon Stephens *et al.* (2016), les véhicules partiellement ou entièrement automatisés réaliseraient ainsi entre 2 % et 5 % moins de déplacements.

### 1.2.3 Autres effets

#### 1.2.3.1 Coûts fixes et variables des VA

Le prix d'achat d'un VA risque fort probablement d'être supérieur à celui d'un véhicule actuel. La technologie nécessaire devrait être dispendieuse dans les premières années. Mosquet *et al.* (2015) estiment qu'une prime de 10 000 \$ pourrait initialement être ajoutée aux véhicules entièrement automatisés. Toutefois, comme on le remarque fréquemment avec les nouvelles technologies, la croissance de la commercialisation des VA pourrait permettre de réduire la différence de prix de vente à près de 3 000 \$ et éventuellement à 1 000 \$ ou 1 500 \$ de plus par véhicule que les prix actuels (Fagnant et Kockelman, 2015).

En revanche, le coût généralisé associé à la conduite devrait diminuer en raison de la diminution des efforts, du temps et de l'argent nécessaires pour voyager (Milakis *et al.*, 2017). Arbib et Seba (2017) estiment qu'une diminution de 90 % des coûts financiers, une diminution de 80 % des coûts d'entretien, une diminution de 90 % des coûts d'assurance et une diminution de 70 % des coûts de carburant pourraient contribuer à réduire les coûts d'exploitation des VA. Le coût de chaque déplacement, que ce soit selon une logique d'autopartage ou de propriétaire unique, devrait donc diminuer. En guise, d'exemple, CAA Québec (2013) estime respectivement les coûts d'entretien et de carburant annuels moyens d'une Civic LX 2013 (4 cylindres) à 3,27 cents et 9,40 cents. Sachant que les automobilistes canadiens parcourent en moyenne

15 200 kilomètres par véhicules (OEE, 2012), cette voiture possède donc des coûts variables moyens de 1 425 \$ pour le carburant et de 497 \$ pour l'entretien. Selon la diminution des frais prévus par Arbib et Seba (2017), l'économie annuelle se situe à 1 396 \$ (998 \$ pour le carburant et 398 \$ pour les frais d'entretien). Sur une période de quatre ans, cette économie représente un montant de 5 584 \$.

Ainsi, les coûts fixes plus élevés risquent d'être compensés par des coûts variables plus faibles. Dans cet exemple, les coûts totaux de possession d'un VA serait donc largement inférieurs aux coûts totaux actuels considérant une prime de 1 000 \$ ou 1 500 de plus par véhicule telle que prédit par Fagnant et Kockelman (2015).

D'autre part, selon Johnson et Walker (2016), un service de mobilité opéré par des VA électriques pourrait entrer sur le marché à peu près au même coût que le coût total de possession et d'exploitation d'un véhicule personnel, soit pour près de 0,62 \$ par kilomètre et, au fur et à mesure que les coûts des batteries diminueront, que leur durée de vie s'améliorera et que la production des VA croîtra, les économies annuelles d'un tel système pourraient atteindre plus de 4 000 \$ par véhicule d'ici 2030. Litman (2014) estime quant à lui le coût initial entre 0,5 \$ et 0,75 \$ par kilomètre et précise que ce coût pourrait diminuer entre 0,37 \$ et 0,62 \$ par kilomètre par la suite.

De plus, Fagnant et Kockelman (2015) élargissent les estimations pour inclure les bénéfices externes. Ils estiment que les impacts se présenteront sous forme de baisse des accidents, de réduction du temps de déplacement, d'économie de carburant et d'avantages liés au stationnement et généreront ainsi une économie d'environ

2 000 \$ par année par véhicule, et pourraient éventuellement atteindre près de 4 000 \$ si l'on tient compte des coûts globaux des accidents.

### 1.2.3.2 Consommation de carburant

Les effets sur la consommation d'énergie sont incertains, mais la plupart des auteurs estiment qu'une économie d'énergie est le résultat le plus probable. Nous évaluerons donc deux types d'effets potentiels, soit la consommation de carburant par véhicule et la consommation totale de carburant.

#### 1.2.3.2.1 Consommation de carburant par véhicule

L'automatisation complète entraînera probablement une diminution de la consommation d'énergie, principalement parce qu'elle a le potentiel d'influencer la conception des véhicules et les modes de conduite (Igliński et Babiak, 2017; Khondaker et Kattan, 2015; Zohdy et Rakha, 2016). En matière d'économie de carburant, un VA correctement programmé, comparativement à un conducteur imprévisible pour un trajet donné, sera en mesure d'appliquer les principes de l'écoconduite (*eco-driving*) en réduisant la consommation de carburant et les émissions de GES jusqu'à 20 % (Igliński et Babiak, 2017). Les véhicules conventionnels ont généralement des capacités de puissance largement supérieures à leurs besoins moyens pour satisfaire des demandes de puissance élevée occasionnelle pour effectuer un dépassement ou simplement pour satisfaire aux désirs de vitesse du conducteur (Brown *et al.*, 2014). Les simulations et les essais sur le terrain ont montré que les véhicules qui roulent à une vitesse constante permettent une économie moyenne de 14 % de carburant comparativement aux voitures qui s'arrêtent et redémarrent continuellement tel qu'en situation de congestion routière ou aux intersections (Xia *et al.*, 2012).

Pour leur part, les résultats de Li et Gao (2013) montrent que la connectivité intervéhiculaire contribue à l'amélioration de la consommation de carburant de plus de 4 % pour les véhicules conventionnels et d'au moins 7 % pour ceux hybrides en permettant une synchronisation des vitesses. Les économies de carburant pourraient donc découler du fait que la plupart des véhicules se déplaceront à une vitesse constante grâce à une optimisation des intersections et de l'efficacité (débit) de la circulation. Les innovations aux intersections rendues possibles grâce à la communication intervéhiculaire peuvent réduire la consommation de 5 % à 16 % avec un système de limite de vitesse variable (Khondaker et Kattan, 2015), de 12 % à 31 % à l'aide d'un système d'optimisation de la consommation de carburant (Wu *et al.*, 2011) et de 45 % avec un système de régulateur de vitesse adaptatif coopératif entre les véhicules (Zohdy et Rakha, 2016).

De plus, l'optimisation de la circulation pourrait se traduire par une réduction de la consommation de carburant et des émissions de GES. Aux heures de pointe, plusieurs embouteillages sont causés par le comportement des automobilistes et les VA permettront une diminution des émissions polluantes résultant de ce trafic (Igliński et Babiak, 2017). L'élimination des embouteillages qui apparaissent à la suite d'accidents permet aussi de réaliser des économies de carburant. Selon Stephens *et al.* (2016), les VA pourraient ainsi entraîner une économie de carburant pouvant atteindre 0,95 % selon une diminution des accidents de 50 %. Ainsi, dans le cas d'une diminution des accidents de 94 %, soit le pourcentage des accidents causés par une erreur humaine aux États-Unis (NHTSA, 2016), l'économie pourrait atteindre 1,79 %.

Kasseris (2006) démontre aussi qu'entre 21 % et 47 % de l'énergie totale utilisée lors de la conduite est consommée respectivement pour surmonter la résistance

aérodynamique en ville et sur l'autoroute. Une diminution de l'espacement nécessaire entre les véhicules permettrait une meilleure utilisation des infrastructures et une conduite aérodynamique puisque les véhicules à l'arrière font face à une résistance moindre. On peut ainsi s'attendre à une diminution de la consommation de carburant et des émissions de GES.

Finalement, les constructeurs automobiles pourraient réduire le poids de leurs véhicules grâce à la sécurité accrue des VA et, ultimement, réduire la quantité d'équipements de sécurité. L'amélioration de la prévention des accidents pourrait réduire la consommation moyenne de carburant d'environ 18 % si cela pouvait inciter tout le monde à opter pour une voiture compacte et, combinée à la réduction des équipements de sécurité, la réduction pourrait atteindre un maximum de 23 % (Mackenzie *et al.*, 2014). Le respect des limites de vitesse et l'absence de manœuvres brusques et irrationnelles réduiront le besoin pour des pneus larges qui sont censés assurer une grande surface de contact avec la route (Igliński et Babiak, 2017). Des roues plus étroites et plus légères contribueront à réduire le poids et la résistance au roulement du véhicule et, par conséquent, à réduire les émissions.

#### 1.2.3.2.2 Consommation totale de carburant

Cependant, l'automatisation permettra aussi aux véhicules de se déplacer plus rapidement et plus aisément et entraînera donc une certaine demande de déplacements et de nouveaux groupes d'utilisateurs. L'augmentation des déplacements pourrait ainsi effacer les économies de carburant entraînées par la conception des véhicules et les modes de conduites plus écoénergétiques.

Par exemple, si chaque véhicule diminue sa consommation de carburant de 20 %, comme prédit par Igliński et Babiak (2017), par rapport à la moyenne canadienne des véhicules légers à essence de 10,6 litres sur 100 kilomètres en 2008 (OEE, 2012) et que, simultanément, la moyenne canadienne annuelle de 15 200 kilomètres parcourus par véhicules (OEE, 2012) augmente de 25 %, aucune économie de carburant ne sera réalisée.

Stephens *et al.* (2016) ont tenté d'estimer les limites supérieures et inférieures des impacts énergétiques aux États-Unis en s'appuyant sur la littérature actuellement disponible. La limite inférieure est caractérisée par une faible augmentation de la demande de déplacements, des véhicules plus légers et plus compacts, une circulation routière constante et de l'autopartage et pourrait entraîner une baisse de 58 % de la consommation d'énergie. À l'inverse, la limite supérieure est caractérisée par une augmentation importante de la demande de déplacements, des déplacements plus rapides, et des voyages sans passager et pourrait entraîner une hausse de 205 % de la consommation d'énergie dans le secteur des transports aux États-Unis.

### 1.3 La question éthique

Plusieurs des discussions actuelles sur les effets associés aux VA partent de la prémisse que les problèmes technologiques sont majoritairement résolus et que les problèmes les plus graves sont liés aux questions sociétales, en particulier celles éthiques. En effet, les VA devront être programmés à l'avance en ce qui a trait à la prise de décision en situation d'accident inévitable.

En termes de probabilité d'accident, les conducteurs sont plus à risque qu'un VA puisqu'ils ont une expérience de conduite limitée, sont parfois pressés par le temps et disposant d'une vision restreinte. En ce sens, 94 % des accidents aux États-Unis peuvent être liés à un choix humain ou à une erreur humaine (NHTSA, 2016). Toutefois, malgré une probabilité d'accident plus faible à bord d'un VA, la prise de décision éthique du véhicule suscite de nombreux questionnements puisqu'il faudra tout de même mettre en place un système de prise de décision éthique.

Les VA seront en mesure de prendre des décisions à l'approche d'un accident imminent à l'aide de logiciels et de capteurs sophistiqués capables de détecter avec précision les trajectoires des véhicules à proximité et d'effectuer des manœuvres d'évitement à grande vitesse. Si un accident est inévitable, le VA peut interpréter les données du capteur et prendre une décision, mais la décision elle-même est le résultat d'une logique développée et codée à l'avance et le véhicule doit donc décider de la meilleure façon de se comporter dans une situation d'accident inévitable. En ce sens, quelqu'un doit décider avec une autorité morale absolue de ce qui est bien ou mal dans chaque situation routière potentielle (Goodall, 2014). Définir les algorithmes qui aideront les VA à prendre ces décisions morales est donc un grand défi. Pour aligner les algorithmes avec les valeurs humaines, nous devons entamer une discussion sur l'éthique derrière ce type de technologie, c'est-à-dire considérer les « algorithmes moraux » que nous sommes prêts à accepter en tant que citoyens et à subir en tant que propriétaires de voitures (Bonneson *et al.*, 2016).

Le cadre théorique entourant les VA démontre que deux écoles de pensées s'affrontent au sujet des effets générés par l'arrivée des VA. Ceux-ci avaient des impacts sur le nombre de déplacements, bien que l'ampleur et le sens des effets



varient selon les études. La littérature présentée dans le premier chapitre servira à développer notre modèle de simulation des déplacements dans la section suivante.

## CHAPITRE II

### APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Au chapitre 1, nous avons exploré les différents niveaux d'automatisation des VA, ainsi que les effets associés à l'arrivée des VA à l'aide d'une revue de littérature sur le sujet. Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur l'élaboration de notre méthodologie, ce qui nous permettra de développer les variables utilisées dans notre modèle de simulation des déplacements. Ce modèle prend en compte les nouveaux déplacements associés au transfert modal des transports collectifs et actifs vers les VA et aux nouveaux groupes d'utilisateurs provenant d'un accès facilité à la conduite automobile. Le modèle prend aussi en compte l'écart possible découlant d'une variation du taux d'occupation moyen des véhicules avant et après l'arrivée des VA.

#### 2.1 Approche méthodologique

La recherche actuelle reprend une méthodologie basée sur la recherche effectuée par Truong *et al.* (2017) sur les impacts de l'arrivée des VA sur le nombre de déplacements en voiture à Victoria, en Australie. Les auteurs ont développé une méthode pour estimer les nouveaux déplacements associés aux VA en mesurant les écarts dans les besoins de déplacements selon les différentes catégories d'âge. Ils présentent des scénarios modélisés à partir du scénario de base, soit celui actuel sans les VA, obtenu à partir des données de l'enquête sur les déplacements et les activités

de Victoria entre 2007 et 2010, soit le *Victorian Integrated Survey of Travel and Activity* (VISTA) 2007-2010.

Notre recherche se veut donc une application de la méthodologie de Truong *et al.* (2017) dans le contexte québécois. Les scénarios présentés sont modélisés à partir du scénario de base (sans VA) et de l'année de référence (2013) obtenus dans le cadre de la dernière enquête Origine-Destination (OD) du Québec menée à l'automne 2013. Cette enquête présente une description de plus de 400 000 déplacements effectués par près de 200 000 personnes (EXO, 2019). Avec ce choix de scénario de référence, l'analyse ne tient pas compte des incertitudes associées à la croissance future du trafic et aux changements d'infrastructure et se concentre donc sur les impacts des VA.

#### 2.1.1 Modèle de simulation

Truong *et al.* (2017) utilisent un modèle de simulation (*car trip model*) qui permet d'estimer le nombre de déplacements journaliers selon un scénario où les VA ont atteint le cinquième niveau d'automatisation, soit l'automatisation complète. Nous conserverons cette hypothèse ainsi que le modèle sans en modifier ses variables.

Nous présentons maintenant la logique de construction du modèle en fonction des diverses étapes menant à l'équation finale. Nous présentons à chaque étape un exemple simplifié qui facilitera la compréhension des termes. Pour certains termes, nous présentons aussi les valeurs réelles que nous utiliserons qui seront expliqués en plus amples détails dans les sections suivantes.

D'abord, le total des déplacements automobiles journaliers actuels ( $DJ_A$ ) sont égaux à la sommation des déplacements des conducteurs ( $DJ_C$ ) et des déplacements des passagers ( $DJ_P$ ).

$$(1) \quad DJ_A = DJ_C + DJ_P$$

Cette équation permet d'obtenir le total des déplacements sur la base d'un taux d'occupation des véhicules d'un individu par véhicule.

En guise d'illustration, un total de 80 000 déplacements complétés par des conducteurs selon un taux d'occupation par véhicule de 1,25 individu par véhicule serait équivalent à 100 000 déplacements complétés par des conducteurs selon un taux d'occupation par véhicule d'un individu par véhicule. Ainsi, nous considérons 100 000 déplacements journaliers au total selon 80 000 déplacements en tant que conducteur et 20 000 déplacements en tant que passager pour rétablir le total des déplacements sur une base d'un individu par véhicule. Nous verrons plus loin que nous diviserons ensuite le total des déplacements journaliers actuels ( $DJ_A$ ) par le nouveau taux d'occupation moyen des véhicules associé au scénario des VA pour obtenir le nombre de déplacements total en fonction des différents scénarios de taux d'occupation des VA.

Ensuite, la quantité de nouveaux déplacements journaliers totaux ( $NDJT$ ) est égale à la sommation du total des nouveaux déplacements journaliers qui seront effectués à la suite de l'introduction des VA ( $NDJ$ ) et du total des nouveaux déplacements journaliers provenant du transfert modal des TC et des transports actifs (TA) vers les VA.

Les nouveaux déplacements journaliers (*NDJ*) proviennent principalement de la croissance des déplacements de la part des jeunes (16 à 19 ans), des personnes ayant des contraintes à la conduite et des personnes âgées (65 ans et plus). Cette valeur est calculée à partir des variations de pourcentage de détention de permis de conduire selon les groupes d'âge et est établie à partir de trois scénarios, soit les scénarios bas, moyen et élevé. Le scénario moyen prédit notamment une augmentation de 253 735 déplacements. Comme mentionné précédemment, nous précisons la méthode de calcul de ces valeurs dans les sections suivantes.

Les nouveaux déplacements associés aux transferts modaux sont pour leur part calculés à partir des pourcentages de transfert,  $\alpha$ , estimés à partir de données de la littérature. Ainsi,  $\alpha_{TC}$  représentent le pourcentage de transfert modal associé au transport en commun, tandis que  $\alpha_{TA}$  est associé au transfert modal du transport actif. Les nouveaux déplacements provenant du transfert modal de chaque mode sont obtenus en multipliant respectivement chaque pourcentage par la somme des déplacements journaliers :  $\alpha_{TC}DJ_{TC}$  pour les transports collectifs et  $\alpha_{TA}DJ_{TA}$  pour les transports actifs.

$$(2) \quad NDJT = NDJ + \alpha_{TC}DJ_{TC} + \alpha_{TA}DJ_{TA}$$

Nous considérons dans notre modèle quatre scénarios différents associés au transfert modal. Nous considérons un transfert modal nul pour les deux modes de transport et

un transfert modal de 8,5 % et 10 % respectivement pour les transports collectifs et les transports actifs vers les VA<sup>3</sup>. Nous obtenons ainsi les quatre scénarios suivants :

**Tableau 2.2 — Scénarios associés au transfert modal**

	$\alpha_{TC}$	$\alpha_{TA}$
Scénario 1	0 %	0 %
Scénario 2	0 %	10 %
Scénario 3	8,5 %	0 %
Scénario 4	8,5 %	10 %

Ensuite, selon la dernière enquête origine-destination (OD) disponible réalisée dans la région métropolitaine de Montréal pour 2013, la somme des déplacements journaliers en transport en commun (train, autobus et métro, incluant les déplacements bimodes) était de 477 000 ( $DJ_{TC} = 477\,000$ ) et la somme des déplacements journaliers en transport actif (marche et vélo) était de 247 000 ( $DJ_{TA} = 247\,000$ ) (EXO, 2019).

C'est donc dire que la somme des déplacements provenant du transfert modal des transports collectifs et actifs vers les VA, selon les valeurs scénario de transfert modal le plus élevé ( $\alpha_{TC} = 8,5\%$  et  $\alpha_{TA} = 10\%$ ) et les hypothèses précédemment établies, est de 65 245 déplacements ( $0,085 * 477\,000 + 0,1 * 247\,000$ ). Additionnée au total des nouveaux déplacements journaliers qui seraient effectués à la suite de l'introduction des VA selon le scénario moyen ( $NDJ = 253\,735$ ), la quantité de

---

<sup>3</sup> Ces valeurs ont été obtenues à partir de données tirées de la littérature et seront expliquées dans le prochain chapitre.

nouveaux déplacements journaliers totaux serait égale à 318 980 déplacements additionnels, soit :  $NDJT = 253\,735 + 0,085 * 477\,000 + 0,1 * 247\,000 = 318\,980$ .

La troisième équation établit la variation en pourcentage du taux d'occupation moyen dans les scénarios de VA ( $OM_{VA}$ ). Ce terme provient de la multiplication de la variation du taux d'occupation moyen des VA par rapport au scénario de référence ( $1 + \alpha_{OM}$ ) par le taux d'occupation du scénario de référence ( $OM_{RÉF}$ ).

$$(3) \quad OM_{VA} = (1 + \alpha_{OM})OM_{RÉF}$$

En 2013, le taux d'occupation moyen des véhicules dans la communauté métropolitaine de Montréal (CMM) était de 1,2 personne par automobile et donc,  $OM_{RÉF} = 1,2$  (EXO, 2019). De cette manière, si le taux d'occupation de référence est de 1,2 personne par voiture ( $OM_{RÉF} = 1,2$ ) et que l'on prédit une augmentation du taux d'occupation de 10 % lorsque les VA auront atteint le cinquième niveau d'automatisation ( $\alpha_{OM} = 0,1$ ),  $OM_{VA}$  est égal à 1,32, soit :  $OM_{VA} = (1 + 0,1) * 1,2 = 1,32$ .

Ainsi, une augmentation de 10 % des taux d'occupation moyens des véhicules selon un scénario de VA correspond à un taux de 1,32 dans notre modèle. Dans notre modèle, nous utilisons 20 scénarios de variation du taux d'occupation ( $\alpha_{OM}$ ), soit entre -5 % et +14 %<sup>4</sup>. Conséquemment,  $OM_{VA}$  varie donc entre 1,14 et 1,37 personne par véhicule. Cette donnée sert de dénominateur dans l'équation finale et permet de

---

<sup>4</sup> Nous expliquerons les raisons qui ont mené au choix de cette plage de valeurs dans le troisième chapitre.

considérer l'impact de variations de taux d'occupation négatives et positives par rapport au scénario de référence.

La dernière équation est égale à la division de la somme des termes des équations 1 et 2 par ceux de l'équation 3 et permet d'obtenir le nombre de déplacements journaliers selon le scénario des VA ( $DJ_{VA}$ ).

L'équation finale obtenue est :

$$(4) \quad DJ_{VA} = \frac{DJ_A + NDJT}{OM_{VA}} = \frac{DJ_C + DJ_P + NDJ + \alpha_{TC}DJ_{TC} + \alpha_{TA}DJ_{TA}}{(1 + \alpha_{OM}) OM_{RÉF}}$$

Le numérateur de l'équation finale est donc égal à la sommation des déplacements journaliers du scénario de base des conducteurs, des déplacements journaliers du scénario de base des passagers, des nouveaux déplacements journaliers découlant de l'arrivée des VA et de la variation provenant d'un transfert modal des transports collectifs et actifs vers les VA (ou l'inverse). Le numérateur est ensuite divisé par le taux d'occupation moyen des automobiles dans un scénario de VA, ce qui permet d'estimer le nombre de déplacements journaliers total dans un scénario de VA.

C'est donc dire que nous diviserons la somme du total des déplacements journaliers actuels ( $DJ_A$ ) et des nouveaux déplacements journaliers associés à l'introduction des VA ( $NDJT$ ) par le nouveau taux d'occupation moyen des véhicules associé au scénario des VA pour obtenir le nombre de déplacements total en fonction des différents scénarios de taux d'occupation des VA.



Les valeurs précédemment assumées nous permettraient ainsi de prédire le nombre de déplacements journaliers selon le scénario des VA, soit :  $DJ_{VA} = \frac{100\,000 + 318\,980}{1,32} = 317\,409$ .

L'inclusion du taux d'occupation moyen des automobiles est primordiale puisqu'il est probable que ce taux varie avec l'arrivée des VA. Nous y reviendrons plus précisément dans la section expliquant les valeurs utilisées dans le modèle. De plus, il existe une possibilité que les VA puissent voyager sans passagers pour aller se stationner ou pour aller récupérer un passager. Ces déplacements pourraient s'ajouter au nombre de déplacements induits par l'arrivée des VA, mais ne seront pas considérés dans la présente recherche puisque nous tenterons de demeurer conservateurs dans notre analyse et ces circuits demeurent trop incertains pour être estimés et inclus. En ce sens, notre discussion des résultats tiendra en compte des impacts potentiels que pourraient avoir de tels déplacements. Toutefois, il est important de noter que les déplacements sans passager peuvent avoir un impact significatif sur les résultats obtenus et grandement diminuer les avantages des VA. Ainsi, il s'agit donc d'une estimation de la borne inférieure des déplacements. Le tableau 2.3 présente un résumé des variables de l'équation finale.

Tableau 2.3 — Description des variables

	Description des variables		
	Nom	Notation	Description
Scénario de référence	Total des déplacements journaliers (conducteur)	$DJ_C$	Déplacements motorisés effectués par des conducteurs
	Total des déplacements journaliers (passager)	$DJ_P$	Déplacements motorisés effectués par des passagers
	Taux d'occupation moyen des automobiles	$OM_{REF}$	Personne/voiture
	Total des déplacements journaliers en TC	$DJ_{TC}$	Déplacements effectués en transports collectifs (train, autobus, métro)
	Total des déplacements journaliers en TA	$DJ_{TA}$	Déplacements effectués en transports actifs (marche, vélo)
Prévision	Total des nouveaux déplacements journaliers associés aux VA	$NDJ$	Nouveaux déplacements effectués suite à l'introduction des VA
	Alpha du transfert modal des TC vers les VA	$\alpha_{TC}$	Pourcentage de transfert des transports collectifs vers les VA
	Alpha du transfert modal des TA vers les VA	$\alpha_{TA}$	Pourcentage de transfert des transports actifs vers les VA
	Alpha du taux d'occupation moyen des automobiles	$\alpha_{OM}$	Variation en pourcentage du taux d'occupation moyen des automobiles dans les scénarios de VA par rapport au scénario de référence.

Simultanément,  $DJ_{VA}$  sera comparé au total des déplacements journaliers dans le scénario de référence ( $DJ_C$ ) pour obtenir la variation en pourcentage ( $\Delta\%DJ_{VA}$ ), soit :

$$(5) \Delta\%DJ_{VA} = \frac{(DJ_A - DJ_C)}{DJ_C} * 100$$

De cette manière, au lieu d'obtenir une valeur en nombre de déplacements, nous obtiendrons un pourcentage de variation par rapport au scénario de référence. C'est donc dire qu'une augmentation totale de 317 409 déplacements équivaudrait à une augmentation de 217,4 % par rapport au scénario de référence hypothétique ( $DJ_C = 100\ 000$ ), soit :  $\Delta\%DJ_{VA} = \frac{(318\ 980 - 100\ 000)}{100\ 000} * 100 = 217,4 \%$ .

### 2.1.2 Collecte de données

Au Québec, les enquêtes OD décrivent les habitudes de déplacements des ménages d'une région donnée. Ces enquêtes à grande échelle permettent de mesurer la mobilité d'un grand nombre de ménages. Par exemple, pour la région de Montréal, l'enquête la plus récente avec données disponibles fut réalisée en 2013 auprès de 78 731 ménages décrivant 410 793 déplacements. L'échantillon évalué représentait 4,3 % des 1 813 000 ménages montréalais (EXO, 2019). Notre scénario de référence utilise en grande partie les données de l'enquête OD 2013. Toutefois, certaines données, notamment en ce qui a trait aux statistiques de détention des permis de conduire par groupe d'âge, ne sont disponibles qu'avec Statistique Canada.

Le tableau 2.4 résume le total des déplacements quotidiens des Montréalais et les parts modales dans le scénario de base. Le total des déplacements journaliers a été obtenu à partir des données de l'enquête OD 2013 (EXO, 2019) et représente les déplacements entre la résidence du répondant et son lieu de travail habituel qui permettent de déterminer la part modale moyenne des navetteurs montréalais.

**Tableau 2.4 — Déplacements et parts modales, région métropolitaine de Montréal, 2013**

Mode	Total des déplacements journaliers domicile-travail	Part modale
<b>Total</b>	<b>2 464 000</b>	<b>100 %</b>
<b>Automobilistes</b>	<b>1 552 000</b>	<b>63 %</b>
Transports collectifs	402 000	16 %
Transport actif	247 000	10 %
Bimode	74 000	3 %
Autres modes collectifs	182 000	7 %
Autres	7 000	0,3 %

Source : EXO, 2019.

### 2.1.3 Traitement des données

D'abord, pour les différents scénarios prévisionnels qui seront utilisés dans notre analyse, les hypothèses suivantes sont émises :

- Tous les véhicules sont entièrement automatisés sans intervention possible par le conducteur. Ainsi, le système de la voiture contrôle le freinage, l'accélération et la direction sous toutes les conditions routières et environnementales gérables par un conducteur humain. De cette manière, les conducteurs ne doivent pas nécessairement être titulaires d'un permis ou avoir les capacités physiques et cognitives pour conduire.
- Les prix de ce type de véhicule sont abordables, soit semblables aux prix actuels d'un véhicule similaire (ex. coupé, sedan). La littérature prédit que la prime initiale associée aux VA par rapport aux véhicules similaires

traditionnels pourrait éventuellement diminuer à 1 000 \$ (Fagnant et Kockelman, 2015) lors de l'arrivée à grande échelle des VA<sup>5</sup>.

- Au Québec, l'obtention d'un permis d'apprenti conducteur est possible à partir de 16 ans. Ce permis doit être conservé pour une période minimale de 12 mois avant de pouvoir obtenir un permis probatoire. Durant cette période, le conducteur doit être accompagné d'une personne titulaire d'un permis depuis au moins 2 ans. La période probatoire dure ensuite 2 ans. Étant donné la nature des VA, nous ferons l'hypothèse que les jeunes seront légalement autorisés à conduire un VA sans supervision d'un parent/tuteur à partir de 16 ans.
- Les systèmes de transports collectifs fonctionnent similairement à aujourd'hui au niveau de la qualité et de la quantité du service<sup>6</sup>.

Ensuite, nous devons préciser que les véhicules entièrement autonomes peuvent offrir de nouvelles possibilités de mobilité à ceux qui ne peuvent ou ne veulent pas conduire un véhicule, en particulier les jeunes sans permis, les individus avec handicap physique et sensoriel et certaines personnes âgées. Ces groupes d'utilisateurs peuvent être en mesure de faire plus de voyages, d'accéder à plus de

---

<sup>5</sup> Les coûts fixes plus élevés risquent aussi d'être compensés par des coûts variables plus faibles. Dans l'exemple présenté à la section 1.2.2.2, les coûts totaux de possession d'un VA, malgré la prime initiale, étaient largement inférieurs aux coûts totaux actuels étant donné les coûts variables inférieurs.

<sup>6</sup> Malgré l'incertitude entourant cette hypothèse, nous n'avons d'autres choix que de tout de même l'émettre, étant donné que les effets des VA sur les transports collectifs n'ont pas encore été étudiés distinctement.

destinations et de se fier à d'autres modes de transport que les trajets partagés, le transport en commun et les taxis (Childress *et al.*, 2015).

Dans notre analyse, sept catégories d'âge sont prises en compte <sup>7</sup>:

1. 16 à 19 ans
2. 20 à 24 ans
3. 25 à 34 ans
4. 35 à 44 ans
5. 45 à 54 ans
6. 55 à 64 ans
7. 65 ans et plus

Les taux de possession de permis de conduire obtenus à partir des données statistiques de la SAAQ (2018a) sont présentés au tableau 2.5.

---

<sup>7</sup> Le choix des catégories d'âge est inspiré de la classification de la SAAQ (2018a) dans son bilan 2017 des accidents, du parc automobile et des permis de conduire.

**Tableau 2.5 — Nombre de permis de conduire et taux de détention par catégorie d'âge**

	RMR de Montréal					
	<i>Nombre de permis</i>		<i>Population</i>		<i>Pourcentage</i>	
	2013	2017	2013	2017	2013	2017
16-19 ans	51 682	45 143	192 610	173 857	26,83	25,97
20-24 ans	156 799	151 408	282 532	278 989	55,50	54,27
25-34 ans	381 286	388 233	578 862	593 727	65,87	65,39
35-44 ans	428 111	447 033	570 325	606 501	75,06	73,71
45-54 ans	478 857	455 066	594 786	574 352	80,51	79,23
55-64 ans	397 492	434 751	484 413	528 737	82,06	82,22
65 et plus	304 836	353 773	597 391	672 973	51,03	52,57
<b>Total</b>	<b>2 199 063</b>	<b>2 275 408</b>	<b>3 300 919</b>	<b>3 429 136</b>	<b>66,62</b>	<b>66,36</b>

Source : SAAQ, 2018a.

Les données de la SAAQ (2018a) pour le nombre de titulaires de permis de conduire sont classées selon les régions administratives du Québec. La région métropolitaine de recensement (RMR) de Montréal regroupe cinq régions administratives, soit Montréal, Laval, Montérégie, Lanaudière et Laurentides. Cependant, alors que l'ensemble des régions administratives de Montréal et Laval se situe sur le territoire de la RMR de Montréal, seulement une partie des trois autres régions s'y situent<sup>8</sup> :

---

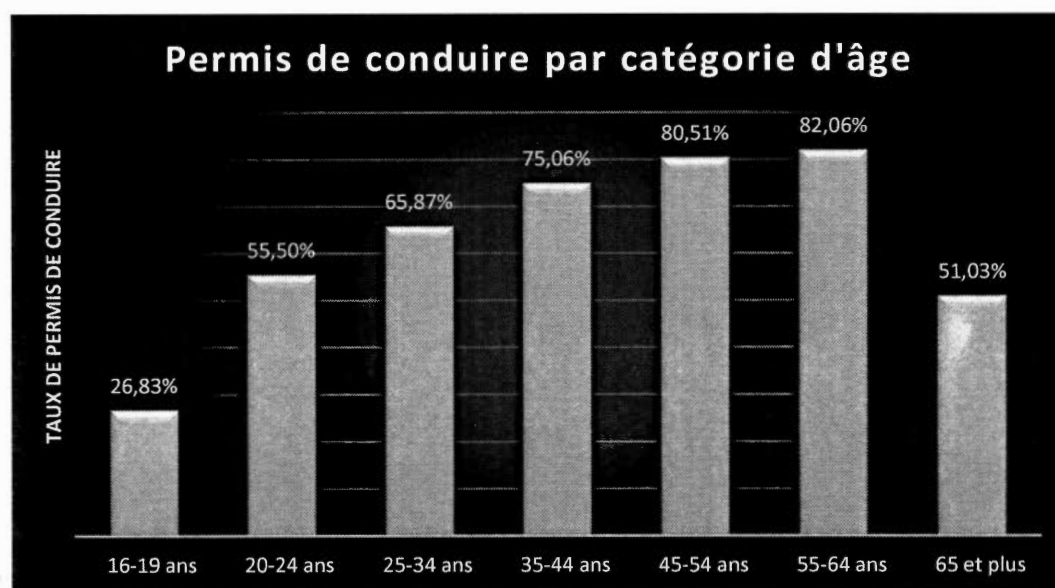
<sup>8</sup> Ces valeurs ont été obtenues à partir des données de la CMM (2016) qui présentent les populations de chaque secteur, MRC et municipalités de la RMR de Montréal. Pour obtenir les pourcentages ci-haut, nous avons simplement divisé les populations de chaque secteur par l'ensemble de la population de chaque région administrative (SAAQ, 2018a).

- Montérégie : 60 %
- Lanaudière : 55 %
- Laurentides : 51 %

Nous avons donc estimé le nombre de permis de conduire de la grande région de Montréal en multipliant le nombre de permis pour chaque région par le pourcentage de sa population qui se situe dans la RMR de Montréal. La figure 2.1 présente les données pour chaque catégorie d'âge.

**Figure 2.1 – Illustration du pourcentage de la population avec permis de conduire par catégorie d'âge pour la RMR de Montréal, 2013**

Source : SAAQ, 2018a.



Le pourcentage de titulaires de permis de conduire augmente par catégorie d'âge, culmine à 55-64 ans avec un taux de 82,06 %, puis diminue par la suite pour le groupe des 65 ans et plus avec un taux de 51,03 %. La moyenne pour la RMR de



Montréal est de 66,62 % pour la population de 16 ans et plus. Le tableau 2.5 présente l'ensemble des données selon les tranches d'âge. Notons que nous utilisons aussi les données de 2017 pour prendre en compte les changements de population entre 2013 et 2017.

Le groupe d'âge de moins de 16 ans a été retiré de notre analyse puisque le taux de détention des permis était inférieur à 1 %. Cette tendance s'explique, et confirme ainsi notre choix, à l'aide de la réglementation en matière de permis de conduire au Québec. Pour obtenir un permis de conduire de la classe 5 (automobile, tracteur, véhicule récréatif, véhicule de service, etc.), il faut avoir plus de 16 ans et avoir le consentement des parents ou tuteurs (SAAQ, 2018b). Ainsi, il nous semble peu réaliste qu'un jeune de 15 ans ou moins puisse être « derrière le volant » d'un VA. Nous émettons donc l'hypothèse que le barème de 16 ans sera aussi le critère utilisé pour ce qui est des VA. Ceci constitue une différence majeure avec les travaux de Truong *et al.* (2017) qui inclut une augmentation des déplacements des adolescents dans leur analyse et estiment que les jeunes de 12 à 17 ans pourront utiliser un VA seul sans supervision.

Les pourcentages de détention de permis par catégorie d'âge sont demeurés plus ou moins semblables, tandis que les changements sociodémographiques font en sorte que le nombre d'individus par groupe d'âge varie considérablement entre les années avec une diminution de près de 19 000 personnes pour les jeunes étudiants de 16 à 19 ans et de 20 434 personnes pour les 45 à 54 ans et une augmentation de 44 324 pour les 55 à 64 ans et de 75 600 personnes pour les retraités de 65 ans et plus. De plus, il demeure préférable d'utiliser les taux de détention de permis de conduire de 2013 puisque la plupart des autres variables proviennent de l'enquête OD de 2013.

## 2.2 Estimation du nombre de nouveaux déplacements

Pour évaluer la croissance du nombre de déplacements par catégorie d'âge, nous estimerons l'augmentation de trois sous-tranches individuellement selon les possibilités qu'apportent les VA aux sous-groupes respectifs. Les sous-groupes seront composés des 16 à 19 ans, des 20 à 64 ans et des 65 ans et plus. Nous procédons de cette manière puisque nous croyons que ces sous-groupes seront affectés différemment par la croissance des VA.

L'évaluation s'effectuera à l'aide du calcul du potentiel de croissance du taux de détention de permis de conduire par groupe d'âge qui sera ensuite multiplié par le pourcentage de déplacements en fonction du nombre total de permis. À Montréal en 2013, un total de 1 296 000 déplacements automobiles ont été complétés en période de pointe du matin sur 2 199 063 permis (SAAQ, 2018a), ce qui équivaut à un pourcentage de 59 %. Ainsi, nous multiplierons par 0,59 la valeur obtenue résultant de l'augmentation du nombre de permis total selon les différents scénarios afin de considérer qu'une augmentation du nombre de permis entraînerait une augmentation équivalente du nombre de déplacements par jour. Cette valeur sera définie comme étant le coefficient d'équivalence des permis de conduire. Le coefficient d'équivalence est la valeur par laquelle les déplacements peuvent augmenter lorsque les permis de conduire augmentent d'une unité.

### 2.2.1 Estimation du nombre de nouveaux déplacements des 16 à 19 ans

Selon les données de Statistique Canada (2001) dans sa série analytique du recensement de 2001, les jeunes de 16 à 19 ans représentent majoritairement des

« étudiants fréquentant les écoles secondaires et les collèges ». Ils forment donc un sous-groupe à eux seuls puisque certaines caractéristiques (ex. : déplacements scolaires) propres à cette catégorie d'âge les différencient de la population active en général.

Pour évaluer le potentiel de croissance du taux de détention des permis de conduire, nous avons choisi d'utiliser le taux des 20 à 24 ans comme taux de référence, car il s'agit de la catégorie d'âge la plus près et ayant fort probablement les comportements de déplacements les plus semblables. En effet, la nature de leurs déplacements se ressemble en partie, ces groupes étant composés d'une majorité d'étudiants qui doivent se déplacer en direction de leur école. En 2015-2016 au Québec, 79 % des jeunes de 16 à 19 ans étaient considérés comme des étudiants à temps plein comparativement à 45 % des jeunes de 20 à 24 ans et à seulement 16 % pour les 24 à 29 ans (Institut de la statistique du Québec, 2017; SAAQ, 2017; Statistique Canada, 2017b).

Actuellement, 26,83 % des 16 à 19 ans possèdent un permis de conduire tandis que ce pourcentage augmente à 55,50 % pour les 20 à 24 ans (SAAQ, 2018a). Pour les fins de l'exercice, nous ferons donc l'hypothèse que, dans un contexte d'automatisation complète de niveau cinq, les jeunes de 16 à 19 ans pourraient obtenir un taux de détention de licence similaire au taux actuel des 20 à 24 ans. Nous évaluons que les déplacements des jeunes de 16 à 19 ans en contexte de VA ressembleront aux déplacements actuels des jeunes de 20 à 24 ans puisque les barrières à l'obtention d'un permis de conduire pour les 16 à 19 ans diminueront.

Nous assumerons que les étudiants d'école secondaire qui se déplacent en autobus scolaire ne verront pas leurs déplacements augmenter, mais qu'une augmentation est

tout de même possible pour les autres étudiants et les autres motifs de déplacements (travail et loisirs). Toutefois, les contraintes financières auxquelles font face les jeunes de 16 à 19 ans pourraient les empêcher d'atteindre le même niveau de mobilité autonome que la population active de 20 à 64 ans. Selon les données de Statistique Canada de 2016, plus de 75 % des jeunes de 19 ans, 90 % des jeunes de 18 ans, 97 % des jeunes de 17 ans et 98 % des jeunes de 16 ans ont un revenu sous la barre des 15 000 \$ (Statistique Canada, 2016). De plus, en 2012, le salaire horaire moyen des employés à temps plein passait de 11,15 \$ pour les 15 à 19 ans à 15,70 \$ pour les 20-24 ans et à plus de 21 \$ pour les 25-29 ans. Additionné au taux d'emploi largement inférieur des 15-19 ans (43,5 %) comparativement aux 20-24 ans (70,3 %), il nous est possible de croire que leur situation financière ne leur permettrait guère d'obtenir un VA malgré un prix potentiellement abordable (Institut de la statistique du Québec, 2014). Conséquemment, les trois scénarios utilisent le taux de détention actuel des 20 à 24 ans de 55,5 % pour les 16 à 19 ans. Les scénarios moyen et élevé majorent ensuite les taux de détention pour les 20 à 24 ans pour prendre en compte des différences précédemment décrites entre les deux groupes d'âge, tandis que le scénario bas ne majore pas le taux pour les 20 à 24 ans.

Le nombre estimé total de titulaires selon chaque catégorie d'âge sera obtenu en multipliant le nombre d'individus par groupe d'âge en 2017 par le nouveau taux de détention hypothétique, soit le taux de détention actuel des 20 à 24 ans de 55,5 %.

### 2.2.2 Estimation du nombre de nouveaux déplacements des 20 à 64 ans

En prenant une technique semblable à celle utilisée par Wadud *et al.* (2016), nous utiliserons le pourcentage de détenteur de permis de conduire du groupe d'âge de 45 à 54 ans comme référence pour les autres groupes d'âge entre 20 et 64 ans. Dans leur

recherche, Wadud *et al.* (2016) ont pour leur part estimé l'augmentation des déplacements de la population de 62 ans et plus en extrapolant linéairement la décroissance des taux de détention de permis entre 44 ans, étant le taux le plus élevé, et 62 ans, où la diminution s'accélère. Ainsi, au lieu de constater une diminution abrupte à partir de 62 ans en lien avec la diminution des fonctions cognitives, les auteurs estiment que le rythme d'augmentation demeure le même avant et après 62 ans (Wadud *et al.*, 2016).

Pour notre part, afin de déterminer l'augmentation de la conduite par les conducteurs de la population active, nous supposons que l'écart entre le taux le plus élevé (82 %) et les taux des autres groupes illustre des besoins de déplacement inférieurs qui pourraient s'accroître avec une augmentation de la qualité de l'offre de véhicules. Le taux le plus élevé correspond au pourcentage de détenteurs de permis du groupe d'âge des 55 à 64 ans.

Nous proposerons donc trois scénarios qui sont présentés dans le tableau 2.6 :

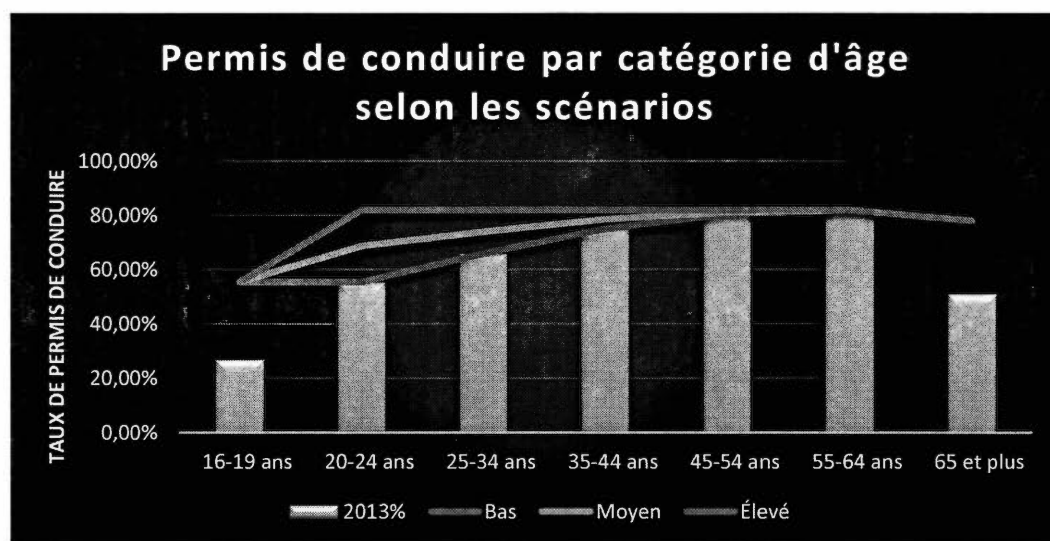
- Bas : aucune modification des déplacements. Les taux de détention des cinq groupes d'âge entre 20 et 64 ans resteront identiques aux taux de 2013.
- Moyen : taux moyen entre le taux le plus élevé de 82 % et le taux actuel de chaque groupe.
- Élevé : utilisation du taux le plus élevé pour tous les groupes de la population active.

**Tableau 2.6 — Taux de détention et variation du nombre de permis de conduire par catégorie d'âge selon les scénarios**

	Scénarios					
	<i>Bas</i>		<i>Moyen</i>		<i>Élevé</i>	
	Nouveau	Variation	Nouveau	Variation	Nouveau	Variation
16-19 ans	55,50 %	44 805	55,50 %	44 805	55,50 %	44 805
20-24 ans	55,50 %	-1966	68,78 %	35 082	82,06 %	72 129
25-34 ans	65,87 %	9791	73,96 %	57 848	82,06 %	105 905
35-44 ans	75,06 %	27 155	78,56 %	48 359	82,06 %	69 562
45-54 ans	80,51 %	-16 451	81,28 %	-12 008	82,06 %	-7565
55-64 ans	82,06 %	36 371	82,06 %	36 371	82,06 %	36 371
65 et plus	78,00 %	220 083	78,00 %	220 083	78,00 %	220 083
Total		319 788		430 539		541 290

La figure 2.2 présente les écarts entre les taux actuels et les taux selon les trois scénarios sous forme de graphique.

**Figure 2.2 – Taux de détention de permis de conduire des trois scénarios vs situation actuelle**



### 2.2.3 Estimation du nombre de nouveaux déplacements des 65 ans et plus

Selon le Collège des médecins du Québec (2013), à partir de 65 ans, les individus présenteraient un risque croissant d'être touché par une condition médicale pouvant affecter leur habilité à conduire (ex. : fonctions cognitives en déclin, Alzheimer et gêne visuelle ou auditive). En ce sens, l'ouïe, la vision, les capacités cognitives et la mobilité sont quatre fonctions qui se détériorent avec l'âge et qui sont primordiales pour assurer une conduite adéquate (Statistique Canada, 2015).

Nous utiliserons les statistiques tirées du tableau « Proportion de personnes de 65 ans et plus titulaires d'un permis de conduire, qui ont conduit un véhicule dans le mois précédent et dont le mode de transport principal est de conduire un véhicule, selon le niveau de capacités fonctionnelles, 2009 » de Statistique Canada (2015). Ce tableau

classe les titulaires de permis de 65 ans et plus selon les niveaux de capacités fonctionnelles.

Les pourcentages du niveau 1 seront utilisés comme référence pour la part de détention de permis de conduire chez les personnes âgées de 65 ans et plus puisque ce niveau établit la part d'individus hautement fonctionnels qui utilisent la voiture comme mode de transport principal. Dans un contexte de VA, cette catégorie d'âge demeure moins mobile puisqu'une majorité d'entre eux ne travaillent plus. En effet, seulement 10,3 % de la population de 65 ans et plus occupaient un emploi en 2017 au Québec (Statistique Canada, 2018). En guise de comparaison, ce taux s'élève à 45,7 % pour le groupe des 60 à 64 ans et à 72,2 % pour le groupe des 55 à 59 ans (Statistique Canada, 2018). Toutefois, nous faisons l'hypothèse que la diminution des déplacements en fonction de la détérioration de leurs capacités cognitives sera considérablement contrebalancée par l'automatisation de niveau 4-5. Ainsi, les données de Statistique Canada (2015) démontrent qu'une proportion de 76,5 %, 76,3 %, 78,7 % et 79,3 % de la population âgée de 65 ans et plus qui sont titulaires d'un permis de conduire valide considère bénéficier respectivement d'une vision, d'une audition, de fonctions cognitives et d'une mobilité de niveau 1. Nous utiliserons donc la moyenne pondérée de ces pourcentages pour obtenir notre valeur finale pour le groupe d'âge des retraités, soit 77,98 %.

### 2.3 Transfert modal des transports collectifs et actifs vers les VA

L'attractivité relative des autres modes de transport sera également modifiée. D'une part, l'amélioration des déplacements en voiture rendra les transports collectifs et actifs relativement moins attrayants ; d'autre part, les véhicules autonomes pourraient



rendre les transports publics plus réactifs et plus abordables dans le cas où ceux-ci deviennent à leur tour autonomes (Davidson et Spinoulas, 2015). En agissant comme un taxi sans conducteur à faible coût, ils pourraient aussi attirer les utilisateurs des TC et des TA qui y verraient une alternative économique et flexible (Millard-Ball, 2016). De plus, la diminution potentielle des accidents et des changements de voies brusques de la part des automobilistes pourrait aussi augmenter l'attrait des TA en augmentant leur confort sur les routes.

Ainsi, étant donné la modification de l'attractivité relative de ces types de transports, nous tenterons d'estimer le transfert modal des transports collectifs et actifs vers les VA à l'aide de données tirées des recherches de Childress *et al.* (2015), Davidson et Spinoulas (2015) et Truong *et al.* (2017).

D'abord, Childress *et al.* (2015) mesurent les effets des VA à l'aide d'un modèle basé sur les activités des réseaux de transport et les choix des voyageurs. Le modèle de déplacement est basé sur la ville de Seattle à Washington, et teste une série d'impacts sur le comportement de déplacement des individus liés au développement de ce type de véhicule. Quatre scénarios ont été testés et montrent que l'amélioration de la capacité routière et de la qualité du trajet peuvent entraîner une augmentation importante du nombre de kilomètres parcourus par les véhicules, tandis que le passage à une utilisation payante de la route par kilomètre parcouru pourrait contrebalancer cette tendance. Comme indiqué par les auteurs, les différents scénarios dépendent de données très incertaines, mais cette recherche, tout comme la nôtre, permet de contribuer aux réflexions des planificateurs et des décideurs dans le but de maintenir des plans régionaux opportuns et éclairés en anticipant efficacement et proactivement l'adoption à grande échelle des VA. Ainsi, notre objectif n'est pas de

prédire avec précision les effets futurs des VA, mais plutôt d'évaluer une gamme d'effets potentiels sur les déplacements motorisés.

Les scénarios évalués par les auteurs explorent comment les voitures sans conducteur peuvent influencer la demande de déplacements selon une utilisation plus efficace des infrastructures routières et selon une modification des temps de déplacement perçus, du coût du stationnement et des coûts d'utilisation des véhicules.

Le troisième scénario est celui qui correspond le mieux avec nos propres hypothèses. Celui-ci prend en compte une augmentation de 30 % de la capacité de toutes les routes et autoroutes, considérée comme étant une estimation conservatrice selon leurs recherches, résultant d'une automatisation complète ou partielle du parc de véhicules automobiles (Childress *et al.*, 2015). Ce scénario considère aussi que les temps de déplacement dans un VA est perçus comme moins onéreux que la conduite non automatisée et que cette valeur est mesurable en la convertissant en une valeur en temps. Un poids de 0,65 a donc été appliqué au temps de déplacement pour tous les déplacements en voiture, de sorte que les valeurs de temps basées sur le temps de déplacement sont réduites de 35 %. Étant donné que les temps de déplacement sont perçus comme plus courts, les gens seront prêts à parcourir de plus longues distances pour se rendre au travail, à l'école, etc. De plus, une réduction ce scénario prédit des coûts de stationnement réduits de moitié pour tenir compte du stationnement autonome des véhicules dans des emplacements moins chers ou pour mieux utiliser l'espace urbain (Childress *et al.*, 2015).

Le premier et le deuxième scénario n'ont pas été considérés puisque ceux-ci ne sont que des versions simplifiées du scénario trois et s'éloignent donc de nos hypothèses.

Le quatrième et dernier scénario ne concorde pas non plus avec nos hypothèses puisque celui-ci considère exclusivement un coût d'utilisation des véhicules par kilomètre parcouru qui comprend les coûts tels que : stationnement des véhicules, entretien des véhicules et des infrastructures, accidents, construction routière, coût des véhicules et externalités négatives (congestion, pollution atmosphérique et réchauffement climatique). Dans ce scénario, les VA sont utilisés selon un système d'autopartage à un coût de 1,03 \$ par kilomètre parcouru et la possession individuelle d'un véhicule n'est plus nécessaire. Tous les coûts d'utilisation de la route sont transférés aux utilisateurs des systèmes d'autopartage selon les distances parcourues respectives (Childress *et al.*, 2015). Nous considérons toutefois que la possession individuelle d'un véhicule demeurera la « norme » au Québec suite à l'introduction des VA et ne pouvons donc pas utiliser le quatrième scénario qui mise principalement sur un système d'autopartage. C'est pourquoi nous utiliserons les résultats du troisième scénario comme valeur estimative du transfert modal possible des transports collectifs et actifs vers les VA. Ce scénario est aussi celui qui correspond le mieux à nos hypothèses. Selon celui-ci, les parts modales passeraient de 2,6 % à 2,4 % pour les TC et de 8,6 % à 6,8 % pour les TA. Cela représente respectivement des diminutions de 7,69 % et 20,93 % (Childress *et al.*, 2015).

Ensuite, la recherche de Davidson et Spinoulas (2015) utilise des scénarios semblables pour calculer les effets possibles de l'arrivée des VA à Brisbane en Australie sur les kilomètres parcourus et sur les transferts modaux induits. Les auteurs utilisent un modèle qui permet de faire varier les paramètres comportementaux par segment de marché (valeur du temps, péages, services publics de destination, etc.). Ils utilisent des simulations de Monte-Carlo pour tracer des valeurs à partir des distributions de probabilité. Chaque paramètre peut être considéré

comme une variable aléatoire et permet de simuler efficacement tous les aspects du choix de déplacement. Le troisième et dernier scénario considère qu'en 2031, une pénétration sur le marché des VA d'environ 75 % est envisageable. Lorsque couplé avec une réduction des frais d'exploitation des voitures de 50 % puisque ceux-ci seront probablement entièrement électriques, il en résulte en une diminution des parts de marché des TC et TA de 13,6 % et 11 % respectivement (Davidson et Spinoulas, 2015).

Toutefois, l'effet sur les parts modales risque d'être lié en partie aux différences régionales. Une zone plus urbaine dotée d'un vaste réseau de TC peut en fait entraîner une diminution des déplacements motorisés puisque les VA ont la capacité à résoudre le « problème du dernier kilomètre » (Bierstedt *et al.*, 2014). Ce problème survient lorsque certains navetteurs préfèrent l'utilisation d'un moyen de transport privé pour s'assurer un trajet porte-à-porte sans perte de temps. Cette technologie pourrait ainsi attirer des utilisateurs de TC en facilitant la connexion à une station de TC à partir de leur maison ou de leur lieu de travail. De cette manière, les véhicules autonomes sont utilisés pour le segment le plus court du trajet et les TC pour le segment le plus long.

Dans l'ensemble, Childress *et al.* (2015) et Davidson et Spinoulas (2015) prédisent respectivement une diminution de 7,69 % et 13,6 % pour les TC et 20,93 % et 11 % pour les TA. En moyenne, ceci représente une diminution de 10,65 % et 15,97 %. Truong *et al.* (2017) ont pour leur part utilisé une diminution entre 0 et 4,18 % pour les TC et entre 0 et 10 % pour les TA. Leur valeur pour les TA provient de la borne inférieure des deux articles précédemment cités tandis que la valeur pour les TC provient d'hypothèses et de calcul basé sur les données VISTA entre 2007 et 2010 à Victoria.

Pour le transfert modal du TA, nous réutiliserons ainsi le 10 % présenté par Truong *et al.* (2017) puisque cette valeur concorde aussi avec les deux recherches citées (Childress *et al.*, 2015 ; Davidson et Spinoulas, 2015). Cette valeur est considérée dans notre modèle en fixant  $\alpha_{TA} = 0,1$ .

Nous n'avons pas recréé les calculs pour obtenir une valeur propre au niveau du transport collectif à Montréal puisque ces calculs sont basés sur des hypothèses incertaines. Nous utilisons donc la moyenne des trois articles de Truong *et al.* (2017), Childress *et al.* (2015) et Davidson et Spinoulas (2015), soit 8,5 %, comme alpha du transfert modal des TC vers les VA. Cette valeur est considérée dans notre modèle en fixant  $\alpha_{TC} = 0,085$ .

#### 2.4 Taux d'occupation moyen des véhicules

La littérature scientifique est divisée à savoir comment les VA influenceront le nombre de personnes par véhicules (Truong *et al.*, 2017 ; Santos *et al.*, 2011 ; Stephens *et al.*, 2016).

Les tendances actuelles du partage des voitures font état de taux d'occupation décroissant dans les dernières années au Québec. Entre 1998 et 2013, ce taux est passé de 1,23 à 1,20 pour une diminution de 2,5 % (EXO, 2019). En émettant l'hypothèse que cette tendance à la baisse de 2,5 % sur une période de 15 ans se poursuivra au même rythme, on peut établir un taux d'occupation moyen d'environ 1,17 en 2028 et de 1,14 en 2043 selon une diminution de 5 %.

Stephens *et al.* (2016) estiment quant à eux que le taux d'occupation moyen des automobiles aux États-Unis pourrait se situer entre 1,6 et 1,7 dans un scénario de niveau 4 ou 5 sans égard à l'autopartage et entre 1,6 et 1,9 selon une présence accrue de l'autopartage. En 2009, le taux d'occupation était de 1,67 (Santos *et al.*, 2011) et la variation se situe donc entre -4 % et +14 %.

Il est toutefois important de noter que l'augmentation du taux d'occupation de la voiture est peu probable, quoique possible. En effet, même si les VA partagés sont plus nombreux que nous l'avons estimé, les déplacements sans conducteur pourraient se produire en raison de la capacité des VA à se stationner et à embarquer des passagers par eux-mêmes et ainsi diminuer le taux d'occupation moyen des véhicules.

Par conséquent, dans notre analyse, divers taux moyens d'occupation des voitures seront testés, le pourcentage de variation du taux d'occupation moyen des voitures par rapport au scénario de base variant entre -5 % (tendance actuelle d'ici 2043) et 14 % (selon Stephens *et al.* (2016); Santos *et al.*, 2011). Afin d'éviter des répétitions, nous présentons les résultats de notre modèle de simulation des déplacements dans l'article au chapitre suivant, à la section 3.8. Néanmoins, étant donné que l'article est présenté dans son intégralité, des éléments des chapitres 1 et 2 sont repris dans le chapitre 3.

Dans le prochain chapitre, nous présenterons donc l'article tel que soumis à la revue *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*.

## CHAPITRE III

### ESTIMATION DES DÉPLACEMENTS AUTOMOBILES GÉNÉRÉS PAR L'ARRIVÉE DES VÉHICULES AUTONOMES DANS LA RÉGION MÉTROPOLITAINE DE MONTRÉAL

Comme mentionné auparavant, ce mémoire se présente sous la forme d'un « mémoire par article » et nous le présentons ici dans son intégralité tel que soumis à la revue *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, et ce, en anglais. Étant donné la nature de l'exercice, des répétitions avec les chapitres précédents sont inévitables puisque l'article est une forme abrégée de ceux-ci.

#### Abstract

We estimate the car trips generated in one year by the arrival of autonomous vehicles (AV) in the Greater Montreal Area. Our research methodology is based on a simulation model which estimates new travel demand associated with AV by measuring differences in travel needs. Given the uncertainty regarding the evolution of critical variables (e.g. vehicle occupancy), we evaluate different scenarios to assess a range of potential effects of AV on motorized travel. Our travel simulation model generates 240 results based on: i) three scenarios associated with changes in the number of driver's licenses by age category; ii) 20 average occupancy rates for automobiles and iii) four modal shift variations. Our model predicts a 13% average

increase in motorized trips and results range between -2% and 31%. For each of the scenarios assessed in the analysis, we estimate the effects of AV on external costs caused by automobile travel. According to our results, AV could reduce private and social costs by \$ 5,059 billion in Quebec.

### 3.1 Introduction

Several manufacturers have indicated that they expect to have fully automated vehicles by 2020-2025 (Gill et al., 2015) and the arrival of AV on the automotive market is now expected by 2025-2030 (Anderson et al., 2014; Litman 2014; Mosquet et al., 2015). More specifically, Trommer et al. (2016) predict that by 2035 the proportion of AV could reach between 17% and 42% in Germany and between 11% and 32% in the United States. The scenarios considered by the Boston Consulting Group (Mosquet et al., 2015) predict, according to various hypotheses, an overall AV market penetration rate of 10% to 19% by 2035, and 20% to 43% by 2040. The results of Bansal and Kockelman (2017) predict an AV penetration rate of 24.8% to 87.2% by 2045, assuming respectively an annual price decrease of 5% to 10%, and a constant willingness to pay based on 2015 values.

In March 2016, the US Department of Transportation (NHTSA, 2016) announced an agreement with automakers requiring that over 99% of new vehicles have automatic emergency braking by 2022. Furthermore, the National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) told Google, in response to a request from the company, that a computer system operating an autonomous vehicle could be considered a driver (Shepardson and Lienert, 2016). This subtlety can clarify several regulations in favor of AV and facilitate their arrival on the roads.



In this context, this article estimates of the number of trips generated by the arrival of AV for the Montreal metropolitan area using a travel simulation model which evaluates a range of potential effects on motorized travel.

The modeling of autonomous vehicles is a fairly new field of study and most of the recent modeling analyses the impacts of AVs at the micro-level, such as specific operational questions (Davidson and Spinoulas, 2015). This field of study has been dominated by research related to the technical evolution of AVs. The advancements made in technical fields are such that it is now possible to evaluate the main implications that AVs will have on our urban mobility networks (Gandia et al., 2019). Furthermore, only a few studies incorporated an analysis of additional trips associated with new user groups, such as teenagers, adults without driver license or mobility-impaired people (Soteropoulos, 2019; Truong et al. 2017). The objective of this research is thus not to accurately predict the future impacts of AVs nor to analyze specific operational or technical questions, but rather to assess a range of potential effects on motorized travel and anticipate potential automated vehicles' impact on transportation networks and traveler choices in order to better understand future travel patterns. Our model will also be one of the first to evaluate the effect of the mobilization of new user groups on the quantity of motorized trips.

In the next section, we present the travel simulation model used to estimate, on a yearly basis, new motorized trips associated with AV. We then present and discuss the results. We predict an average increase of 13% in motorized trips as per overall results, and results range between -2% and 31% depending on scenarios. The scenarios will be presented and detailed in this section of the article. The paper ends with the conclusion and some research perspectives.

### 3.2 The model

Our research is based on the simulation model developed by Truong et al. (2017), which estimates new motorized trips associated with AV by measuring differences in travel needs across age groups, according to a scenario in which AV are fully automated. AV scenarios are modeled with the base case (without AVs) and the base year (2013) obtained from Quebec's latest Origin-Destination (OD) survey conducted in fall 2013. This survey presents a description of more than 400 000 trips made by almost 200 000 individuals (EXO, 2019).

With this base case selection, the analysis ignores uncertainties associated with future traffic growth and infrastructure changes and hence focus on AVs' impacts. For the various scenarios, the following assumptions are made:

- All vehicles are fully automated without any interventions by the driver. Thus, the car system controls braking, acceleration and steering under all road and environmental conditions faced by a human driver. Hence, drivers do not necessarily have to be licensed or have the physical and cognitive ability to drive.
- Prices for this type of vehicle are affordable. The literature predicts that the initial AV-related premium over traditional similar vehicles could potentially decrease to \$ 1,000 (Fagnant and Kockelman, 2015) following the large-scale arrival of AV. Furthermore, higher fixed costs may also be offset by significantly lower variable costs (Arbib and Seba, 2017).

- Given the nature of AV, it will be assumed that young individuals will be legally allowed to drive an AV without supervision from a parent / guardian from the age of 16.
- Public transport (PT) systems function similarly to today in terms of the quality and quantity of service. Therefore, the comparative advantage of individual vehicles, in relation to PT, remains constant, even though it is believed that PT systems will become more efficient (Soteropoulos et al., 2019). Since the impact of autonomous vehicles on PT as not yet been studied distinctly, it is difficult for us to make a more precise assumption regarding these impacts.

### 3.3 Car trip model

The potential impacts of AV on car trips will be explored using a car trip model designed to predict the number of new total daily trips associated with AV, while including the new trips associated with modal transfers and considering the percentage change in the average occupancy rate. Following Truong *et al.*, the total increase in daily motorized trips can be calculated as:

$$DT_{AV} = \frac{DT_D + DT_P + NDT + \alpha_{PT}DT_{PT} + \alpha_{AT}DT_{AT}}{(1 + \alpha_{AO})AO_{REF}}$$

In order to evaluate the impact of AV, we first calculate the total current daily trips by car ( $DT_C$ ), which is equal to the sum of driver trips ( $DT_D$ ) and passenger trips ( $DT_P$ ).

$$(1) \quad DT_C = DT_D + DT_P$$

This equation is used to obtain total trips, based on an occupancy rate of one individual per vehicle. By way of illustration, a total of 80,000 trips completed by drivers and 20,000 passenger trips would be equivalent to a vehicle occupancy rate of 1.25 individual per vehicle, which would then be equivalent to 100,000 trips completed by drivers based on an occupancy rate of one individual per vehicle. This will be the baseline scenario used to illustrate our model.

Next, the number of new total daily trips ( $NTDT$ ) is equal to the summation of the total new daily trips following the introduction of AV ( $NDT$ ) and the total new daily trips resulting from the modal shift of PT and active transportation (AT) to AV.

$NDT$  comes mainly from the growth in travel by young individuals (aged 16 to 19), those with driving constraints, and senior citizens (aged 65 and over). This value is calculated from percentage changes in driver's license ownership by age group, for which we considered three scenarios: low, medium and high.

The new trips associated with modal transfers are calculated from the transfer percentages,  $\alpha$ , estimated using data from the literature. Thus,  $\alpha_{PT}$  represents the modal shift percentage associated with PT, while  $\alpha_{AT}$  is associated with the modal shift from AT. The new trips resulting from the modal shift of each mode are

obtained by respectively multiplying each percentage by the sum of the daily trips:  $\alpha_{PT}DT_{PT}$  for PT and  $\alpha_{AT}DT_{AT}$  for AT.

$$(2) \quad NTDT = NDT + \alpha_{PT}DT_{PT} + \alpha_{AT}DT_{AT}$$

This model considers four different scenarios associated with modal shift. First, a zero modal transfer for both modes of transport, followed by a modal shift of 8.5% and 10% respectively for PT and AT to AV. These values were derived from data in the relevant literature and will be explained in the next section. The different scenarios are presented in table 3.1.

**Table 3.1 — Modal shift scenarios**

	<b>Public transportation</b>	<b>Active transportation</b>
Scenario 1	0%	0%
Scenario 2	0%	10%
Scenario 3	8,5%	0%
Scenario 4	8,5%	10%

According to the 2013 OD survey of the Montreal metropolitan area, the sum of daily trips by PT (train, bus and subway, including dual mode travelers) was 477,000 ( $DT_{PT} = 477,000$ ) and the sum of daily trips by AT (walking and cycling) was 247,000 ( $DT_{AT} = 247,000$ ) (EXO, 2019).

This means that the sum of trips from the modal shift of public and active transport to AV, according to the values of the last modal shift scenario ( $\alpha_{CT} = 8.5\%$  and  $\alpha_{AT} = 10\%$ ) and the assumptions previously established, is 65,245 trips ( $0.085 * 477,000 + 0.1 * 247,000$ ). Added to the total of the new daily trips that will be made following the introduction of the AV according to the average scenario ( $NDJ = 253,735$ ), the

amount of new total daily trips is thus 318,980 additional trips :  $NTDT = 253,735 + 0.085 * 477,000 + 0.1 * 247,000 = 318,980$ .

The third equation establishes the percentage change in the average occupancy rate in the AV scenarios ( $AO_{AV}$ ). This term comes from the multiplication of the variation of the average occupancy rate ( $1 + \alpha_{AO}$ ) by the occupancy rate of the reference scenario ( $AO_{REF}$ ).

$$(3) \quad AO_{AV} = (1 + \alpha_{AO})AO_{REF}$$

In 2013, the average occupancy rate of vehicles in the Montreal Metropolitan Community was 1.2 individual per automobile and therefore  $AO_{REF} = 1.2$  (EXO, 2019). Thus, a 10% increase in average vehicle occupancy rates under an AV scenario corresponds to a rate of 1.32 in our model. Since 20 scenarios of variation were applied, ranging from -5% to +14%, the rate varies between 1.14 and 1.37 individual per vehicle.

The fourth and last equation is the division of the sum of the terms of equations 2 and 3 by those of equation 4, resulting in the number of daily trips in the AV scenario ( $DT_{AV}$ ):

$$(4) \quad DT_{AV} = \frac{DT_C + NTDT}{AO_{AV}} = \frac{DT_D + DT_P + NDT + \alpha_{PT}DT_{PT} + \alpha_{AT}DT_{AT}}{(1 + \alpha_{AO})AO_{REF}}$$

The numerator of the final equation is therefore equal to the sum of the daily trips from the base scenario made by drivers, the daily trips from the base scenario made by passengers, the new daily trips resulting from the arrival of AV, and the variation

from a modal shift of PT and AT to AV (or vice versa). The numerator is then divided by the average occupancy rate of cars in an AV scenario, making it possible to estimate the number of daily trips in an AV scenario.

For example, based on the previous assumptions, the values obtained would predict a total increase of 317,409 trips:  $DT_{AV} = \frac{100,000 + 318,980}{1.32} = 317,409$ .

Table 3.2 summarizes the variables in the final equation.

**Table 3.2 — Description of variables**

	Description of variables		
	Name	Notation	Description
<b>Reference Scenario</b>	Total daily trips (driver)	$DT_D$	Motorized trips made by drivers
	Total daily trips (passenger)	$DT_P$	Motorized trips made by passengers
	Average occupancy of vehicles	$AO_{REF}$	Individual/Car
	Total daily trips by PT	$DT_{PT}$	Trips made by public transportation (train, bus, metro)
	Total daily trips by AT	$DT_{AT}$	Trips made by active transportation (walking, biking)
<b>Prediction</b>	Total new daily trips associated with AV	$NDT$	New trips made following the introduction of AV
	Alpha of modal transfer from PT to AV	$PT$	Percentage transfer from public transportation to AV
	Alpha of modal transfer from AT to AV	$AT$	Percentage transfer from active transportation to AV
	Alpha of average occupancy rate of cars	$AO$	Percentage variation of average occupancy rate of cars in AV scenarios relative to reference scenario

Simultaneously,  $DT_{AV}$  is compared to the total daily trips in the reference scenario ( $DT_D$ ) to obtain the percentage change ( $\Delta\%DT_{AV}$ ), i.e. :

$$(5) \Delta\%DT_{AV} = \frac{(DT_C - DT_D)}{DT_D} * 100$$



This means that a total increase of 317,409 trips is equivalent to an increase of 217.4% over the baseline scenario.

### 3.4 Estimation of the number of new trips

To estimate the increase in the number of trips by age group, the increases in each of three sub-segments are estimated individually, based on the possibilities that AV bring to the respective subgroups. The assessment is done by calculating the growth potential in driver's license holding rates by age category, which will then be multiplied by the percentage of trips based on the total number of licenses. In Montreal in 2013, a total of 1,296,000 automobile trips were completed during the morning peak period, out of 2,199,063 licenses (SAAQ, 2018a). Thus, the value obtained resulting from the increase in the number of total licenses will be multiplied by 0.59 in each of the scenarios, accounting for the consideration that an increase in the number of licenses would lead to an equivalent increase in the number of trips per day. This value will be defined as the coefficient of equivalence of driver's licenses, i.e. the value by which travel could increase when driver's licenses increase by one.

The sub-groups will be composed of 16 to 19 year-olds, 20 to 64 year-olds and 65 years and over. This subdivision assumes that these subgroups will be affected differently by the growth of AV.

#### 3.4.1 Estimation of the number of new trips for 16 to 19 year-olds

According to Statistics Canada (2001), 16 to 19 year-olds are predominantly "high school and college students". They therefore form a subgroup of their own, since

certain characteristics (e.g. : school trips) specific to this age group differentiate them from the general labor force.

To assess the growth potential of the driver's license holding rate, the 20-24 age group was chosen as the reference rate, because it is the closest age group and very likely has the most similar travel behaviors. Indeed, the nature of the trips is similar, both groups being composed largely of students who must travel to their school. In 2015-2016 in Quebec, 79% of young people aged 16 to 19 were considered full-time students compared to 45% of young people aged 20 to 24, and only 16% of those aged 24 to 29 (ISQ, 2017; SAAQ, 2017; Statistics Canada, 2017).

Currently 26.83% of 16 to 19 year-olds have a driver's license while this percentage increases to 55.50% for 20 to 24 year-olds (SAAQ, 2018a). For the purposes of the analysis, it is therefore assumed that, in a fully automated environment, 16 to 19 year-olds could hold licenses at a similar rate than the current 20 to 24 year-olds rate. Consequently, travel from people aged 16 to 19 in an AV context is considered similar to the current travel of 20 to 24 year-olds, as barriers to obtaining a driver's license for 16 to 19 year-olds will decrease.

It is also assumed that high school students who travel by school bus will not see their travel increase, but an increase is still possible for other students and other reasons for travel (work and leisure). However, the financial constraints faced by young people aged 16 to 19 may prevent them from achieving the same level of self-mobility as the working population aged 20 to 64. Over 75% of 19 year-olds, 90% of 18 year-olds, 97% of 17 year-olds and 98% of 16 year-olds have incomes below \$15,000 (Statistics Canada, 2016). In addition, in 2012, the average hourly wage for full-time employees went from \$11.15 for 15-19 year-olds to \$15.70 for 20-24 year-olds, to over \$21.00

for 25-29 year-olds. Added to the much lower employment rate of 15-19 year-olds (43.5%) compared to 20-24 year-olds (70.3%), it is likely that their financial situation would not allow them to obtain AV despite a potentially affordable price (ISQ, 2014). As a result, the three scenarios use the current 20 to 24 year-olds license holding rate of 55.5% for 16-19 year-olds. The medium and high scenarios then increase the detention rates for the 20 to 24 year-olds age group to account for previously described differences between the two age groups, while the low scenario does not increase the rate for the 20 to 24 year-olds age group.

The estimated total number of license holders in each age group will be obtained by multiplying the number of individuals per age group in 2017 by the new hypothesized license holding rate.

The 2017 population is used to account for population changes between 2013 and 2017. The percentages of licenses by age group have remained more or less identical, whereas sociodemographic changes make the number of individuals per age group vary considerably between years. Furthermore, it is reasonable to use the 2013 driver's license holding rates since most other variables come from the 2013 OD survey.

#### 3.4.2 Estimation of the number of new trips for 20 to 64 year-olds

As done by Wadud *et al.* (2016), the percentage of license holders aged 45 to 54 is used as a reference for other age groups between 20 and 64 year olds. Wadud *et al.* (2016) estimated the increase in trips for the population aged 62 and over by linearly extrapolating the decline in license ownership rates between 44 years old, being the highest rate, and 62 years old, where the decrease accelerates. Thus, instead of seeing

a steep decline in trips from age 62 linked to the decrease in cognitive functions, the authors estimated that the rate of increase remains the same before and after 62 years (Wadud *et al.*, 2016).

For the purposes of the current study, it is assumed that the difference between the highest rate (82%) and the rates of the other groups illustrates inferior travel needs, which could increase with an increase in the quality of the vehicle supply. The highest rate is the percentage of license holders in the 55 to 64 year old age group.

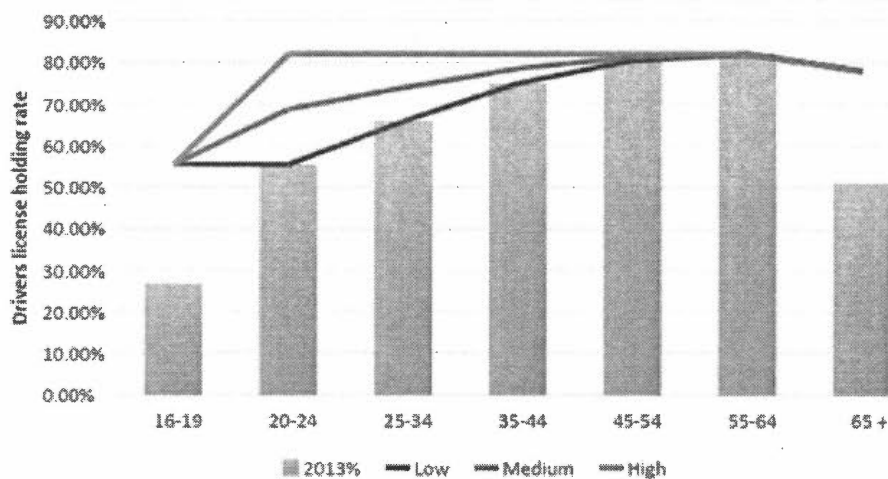
Three scenarios are thus proposed (See Table 3.3 and Figure 3.1):

- Low : no change in trips. Holding rates for the five age groups between 20 and 64 will remain the same as in 2013;
- Medium: average rate between the highest rate of 82% and the current rate of each group.
- High: use of the highest rate for all groups in the labor force.

**Table 3.3 — Detention rates and variations in the number of drivers licenses by age category according to the scenarios**

	Scenarios					
	Low		Medium		High	
	New %	Variation	New %	Variation	New %	Variation
16-19	55,50 %	44,805	55,50 %	44,805	55,50 %	44,805
20-24	55,50 %	-1966	68,78 %	35,082	82,06 %	72,129
25-34	65,87 %	9791	73,96 %	57,848	82,06 %	105,905
35-44	75,06 %	27,155	78,56 %	48,359	82,06 %	69,562
45-54	80,51 %	-16,451	81,28 %	-12,008	82,06 %	-7565
55-64	82,06 %	36,371	82,06 %	36,371	82,06 %	36,371
65 and up	78,00 %	220,083	78,00 %	220,083	78,00 %	220,083
Total		319,788		430,539		541,290

**Figure 1.1 – Driver's license by age category according to the scenarios**



### 3.4.3 Estimation of the number of new trips for 65 year-olds and over

According to the Quebec Medical Association (*Collège des médecins*, 2013), people over the age of 65 have an increased risk of having a medical condition that may affect their ability to drive (e.g. visual impairment).

Statistics Canada (2015) developed a table that ranks license holders 65 years old and older by functional ability levels.

The first functional ability level establishes the share of highly functional individuals who use the car as their primary mode of transportation. Consequently, the percentage associated with level 1 will be used as a reference for the share of driver's licenses held by people aged 65 and over. In an AV context, this age group remains less mobile as a majority of them no longer work. In fact, only 10.3% of the population aged 65 and over had a job in 2017 in Quebec (Statistics Canada, 2018). By way of comparison, this rate is 45.7% for the 60 to 64 age group and 72.2% for the 55 to 59 age group (Statistics Canada, 2018). However, it is hypothesized that the decrease in trips as a function of the deterioration of their cognitive abilities will be considerably counterbalanced by the arrival of AV. Thus, 76.5%, 76.3%, 78.7% and 79.3% of the population aged 65 and over who hold a valid driver's license can be considered to benefit from level 1 vision, level 1 hearing, level 1 cognition, and level 1 mobility, respectively (Statistics Canada, 2015). The weighted average of these percentages will thus be used to obtain the final value of 77.98% for the senior citizens age group.

### 3.5 Modal transfer of public and active transportation to AV

Most studies that investigate impacts of AVs on mode share indicate that AVs lead to a reduction in PT and AT (Soteropoulos, 2019), but no consensus has been reached regarding the level and the direction of modal shift to be expected. Indeed, as the attractiveness of private vehicles changes, the relative attractiveness of other modes of transport will also change.

On the one hand, improving car travel will make public and active transport relatively less attractive. On the other hand, autonomous vehicles could make PT more responsive and more affordable if it too becomes autonomous (Davidson and Spinoulas, 2015). By acting as a low-cost driverless taxi, AV could also attract PT and AT users who would find it an economical and flexible alternative (Millard-Ball, 2016). In addition, the potential decrease in accidents and abrupt lane changes by motorists could also increase the attractiveness of AT by increasing comfort on the roads.

Given the change in the relative attractiveness of these types of transport, we estimate the modal shift of public and active transport to AV using data from studies by Childress *et al.* (2015), Davidson and Spinoulas (2015) and Truong *et al.* (2017), as indicated in table 3.4.

**Table 3.4 — Summary of modal shifts studies considered**

Modal shift					
Authors	Model	Description	Hypothesis	Results	
				PT	AT
Childress et al.	Activity-based travel model (Soundcast)	Organized around individual's daily travel pattern linked together by mode, destination, time-of-day, and other activities in the daily pattern.	Increase capacities of freeway and major arterial by 30%, reduction of value of time spent in AVs trips by 65% and reduction of parking costs by half.	-7.7%	-20.9%
Davidson et Spinoulas	TransPosition's segmented stochastic slice simulation (4S) model	Utility model using a generalised cost approach, which allows the testing of different AV hypothesis through Monte Carlo simulation.	Electric AV in 2031: 75% market penetration, increase trip rate of 20%, reduction of 50% in vehicle operating costs, no variation in roads capacities, reduction of value of time by 10% to 50%.	-13.6%	-11%
Truong et al.	Car trip model	Parameters are estimated using actual travel patterns from VISTA data.	All AVs are fully automated, shared AVs are available, people aged 12 to 17 years old can drive.	-4.2%	0 to -10%
Pepin et Tanguay	Car trip model	Parameters are estimated using actual travel patterns from Quebec's latest Origin-Destination (OD) survey conducted in fall 2013	All AVs are fully automated, prices are affordable, PT systems function similarly to today, people aged 16 to 17 can drive without supervision	0 to -8.5%	0 to -10%

Overall, Childress *et al.* (2015) and Davidson and Spinoulas (2015) respectively predict decreases of 7.69% and 13.6% for PT and 20.93% and 11% for AT. On average, this represents a decrease of 10.65% and 15.97%. Truong *et al.* (2017) used a decrease of 0 and 4.18% for PT and 0 and 10% for AT. Their AT values comes from the lower bound of the two articles previously cited, while the values for PT comes from assumptions and calculation in the VISTA data between 2007 and 2010 in Victoria.



For the AT modal shift, the 10% presented by Truong *et al.* (2017) will be used, since this value is aligned with the two cited studies (Childress *et al.*, 2015, Davidson and Spinoulas, 2015). This value is considered in this model by setting  $\alpha_{AT}$  equal to 0.1.

The calculations were not recreated to obtain a specific value for PT in Montreal since these calculations are based on uncertain assumptions. Instead, an average of the three articles was used, namely Truong *et al.* (2017), Childress *et al.* (2015) and Davidson and Spinoulas (2015). This results in an alpha value of modal shift from PT to AV of 8.5%. This value is considered in the model by setting  $\alpha_{PT}$  equal to 0.085.

### 3.6 Average occupancy rate of automobiles

The scientific literature is divided about how AV will influence the number of individuals per vehicle (Truong *et al.*, 2017, Santos *et al.*, 2011, Stephens *et al.*, 2016).

Current trends in car sharing show declining occupancy rates in Quebec in recent years. Between 1998 and 2013, this rate went from 1.23 to 1.20, a decrease of 2.5% (EXO, 2019). If this downward trend of 2.5% over a 15-year period continue at the same rate, an average occupancy rate of approximately 1.17 in 2028 and 1.14 in 2043 can be established, which is a decrease of 5%.

Stephens *et al.* (2016) estimate that the average occupancy rate for cars in the United States could be between 1.6 and 1.7, not considering car sharing, and between 1.6 and 1.9 with increased car sharing, after the arrival of AV. In 2009, the occupancy rate was 1.67 (Santos *et al.*, 2011), and thus the variation is between -4% and 14%.

Therefore, in our analysis, various average car occupancy rates are tested, with the percentage change in the average occupancy rate of cars from the baseline scenario varying between -5% (current trend by 2043) and 14% (according to the article cited above).

### 3.7 Results

Our model produced 240 results from three scenarios associated with changes in the number of driver's licenses (low, medium, high), 20 average occupancy rates for automobiles (between -5% and +14%) and four modal shift variations ( $\alpha_{PT}$ ,  $\alpha_{AT}$ ). The overall results are presented in the appendix (see Appendix A, B and C).

Eighty results were obtained per scenario, which are briefly presented using tables 3.5, 3.6 and 3.7. The tables present 20 results per scenario, i.e. five occupancy rates and four variations of the modal shift. The average variation in percentage of motorized trips for all 240 results is 13% and the results range as follows:

- The medium scenario shows variations from 2% to 26% with an average of 13%.
- The low scenario shows variations from -2% to 22% with an average of 9%.
- The high scenario shows variations from 5% to 31% with an average of 17%.

**Table 3.5 - Percentage of variation in motorized trips in a medium AV scenario**

	PT	AT	AO				
			-0,05	0	0,05	0,1	0,14
1	0	0	22 %	16 %	10 %	5 %	2 %
2	0	0,1	24 %	18 %	12 %	7 %	3 %
3	0,085	0	25 %	19 %	12 %	8 %	4 %
4	0,085	0,1	26 %	20 %	14 %	9 %	5 %

**Table 3.6 - Percentage change in motorized trips in a low AV scenario**

	PT	AT	AO				
			-0,05	0	0,05	0,1	0,14
1	0	0	18 %	12 %	6 %	2 %	-2 %
2	0	0,1	19 %	13 %	8 %	3 %	-1 %
3	0,085	0	20 %	14 %	9 %	4 %	0 %
4	0,085	0,1	22 %	16 %	10 %	5 %	2 %

**Table 3.7 - Percentage change in motorized trips in a high VA scenario**

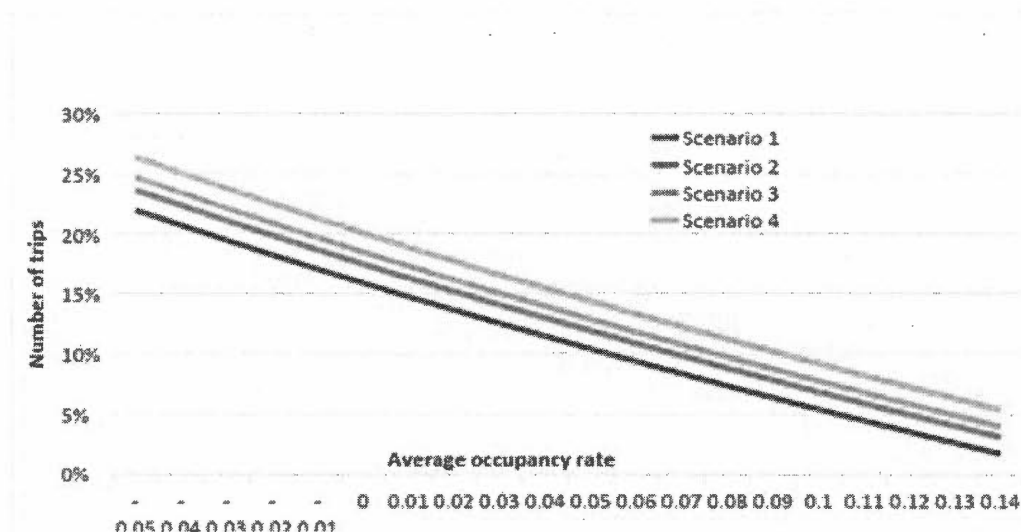
	PT	AT	AO				
			-0,05	0	0,05	0,1	0,14
1	0	0	26 %	20 %	14 %	9 %	5 %
2	0	0,1	28 %	22 %	16 %	11 %	7 %
3	0,085	0	29 %	23 %	17 %	12 %	8 %
4	0,085	0,1	31 %	24 %	18 %	13 %	9 %

### 3.7.1 Modal shift and change in average occupancy rate of automobiles

The percentage changes in car trips for various modal shift scenarios in a medium scenario are summarized in Figure 3.2. If the arrival of AV does not destabilize the current average occupancy rate of cars, these results predict an increase in travel from 12% to 16%, 16% to 20% and 20% to 24% in a low, medium and high scenario. Otherwise, the increase in average scenario trips is between 2%, based on a 14% increase in occupancy, and 26%, based on a 5% decrease in occupancy. For the other scenarios, the variation of trips is between -2% and 22% for the low scenario and between 5% and 31% for the high scenario. The lower limit of the results is characterized by no modal shift and a 14% increase in the occupancy rate of the vehicles. Conversely, the upper limit is characterized by a modal transfer of 8.5% of

PT to AV, and of 10% of AT to AV, as well as a 5% decrease in the occupancy rate of the vehicles.

**Figure 3.2 — Variations in car trips of various modal shift scenarios in a medium scenario**



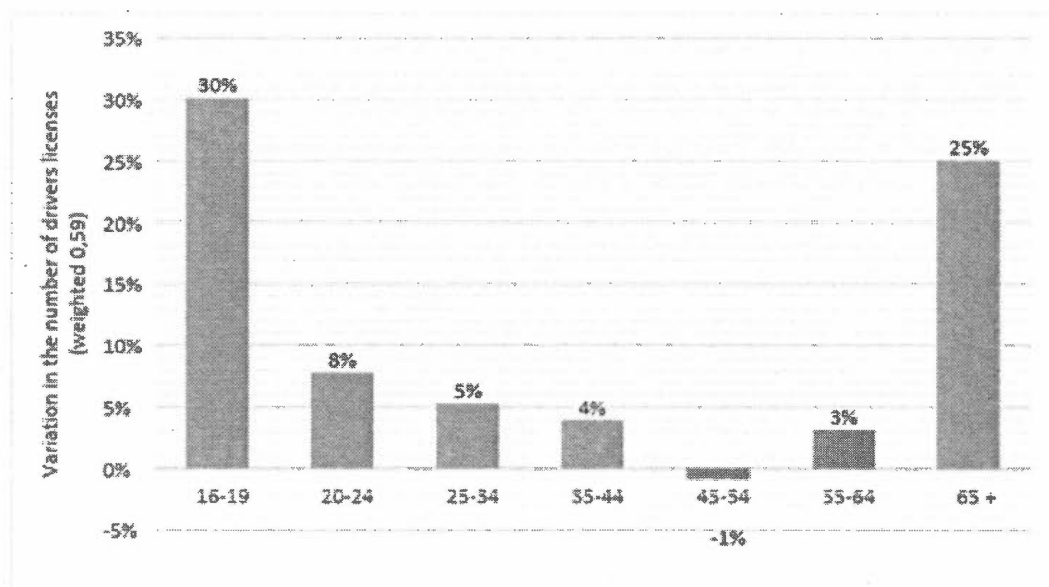
Still applying a zero variation in the occupancy rate and an average scenario of variation in the number of driver's licenses, PT modal shift of 8.5% and AT modal shift of 10% led to a 4.19% increase in travel. 2.6% come from the modal shift from PT to AV, and 1.6% from the modal shift from AT to AV.

### 3.7.2 New daily trips associated with AV

Figure 3.3 shows the percentages of new trips generated by AV in the medium scenario compared to the baseline scenario and by age group. These values are

obtained by dividing the increase in trips (increase in driver's licenses multiplied by the driver's license equivalence coefficient of 0.59) by the estimation of the number of trips in the reference scenario (sum of driver's licenses multiplied by the equivalence coefficient). As previously indicated, this scenario uses the average rate between the highest driver's license rate, 82%, which comes from the literature, and the current rate for each age group between 20 and 64 years old.

**Figure 3.3 — Percentage of new trips per day by age group - Medium scenario**



The 16 to 19 year-olds age group had the largest increase at 30%, followed by the 65 years and over age group with 25%. These two groups have the same results for each of the three scenarios. Age groups between 20 and 64 have much smaller increases given their higher driver's license rates in the baseline scenario. Finally, the 45 to 54 year-olds age group has a decrease of 1%. This is due to the fact that their population

will decrease between 2013 and 2017, and that their current rate of license holding approaches the highest rate. Overall, new trips associated with AV could be responsible for a 7% increase in daily trips compared to the reference scenario.

These results suggest that the increase in car trips across the various scenarios would be caused mainly by new trips rather than by modal changes. This can be explained by the low AT and PT modal relative shares (compared to the modal share of vehicles) which are respectively 7.23% and 22.28%. Without considering a modal shift, only the improved mobility that AV offer to those who are too young to drive, who do not have a driver's license, and to the elderly, would lead to a significant increase in car trips. This reaffirms the importance of exploring the increase in vehicle travel, both from commuter modal shifts and from new trips.

The impact of car occupancy on changes in car travel is clearly a major factor affecting these results. As shown in Figure 3.2, car travel decreases almost linearly with the increase in car occupancy. For example, if the average occupancy rate of cars is reduced by 5% compared to the current situation, car trips increase from 18% (low scenario) to 26% (high scenario), ignoring new trips. In addition, trips increase between 22% (low scenario) and 31% (high scenario) when modal transfers from both AT and PT are included.

In addition, while the average occupancy rate of cars increases by 14%, the average scenario estimates a decrease of 2% to 5% in car trips, depending on whether only new trips are considered, or both new trips and modal changes.

### 3.7.3 Discussion

Given the downward trend in car occupancy rates in Montreal, the motorists' preference for single-owner cars (Litman, 2017) and the trips between parking and pick-up of passengers, the car occupancy rate is expected to decrease. It is thus likely that the number of trips by car will increase considerably.

However, an increase in the car occupancy rate is possible, although it seems unlikely. Indeed, even if the shared AV are more numerous than has been estimated, driverless trips can occur due to the ability of AV to park and board passengers on their own and thus decrease average occupancy of vehicles.

In addition, it must be reiterated that travel without passengers can have a significant impact on the results, and greatly reduce the benefits of AV. Thus, this study represents an estimate of the lower limit for the number of trips. Indeed, there is a possibility that AV can travel without passengers to go park or pick up a passenger. These trips could be added to the number of trips induced by the arrival of AV, but are not considered in the present research, which remains conservative in regard to the estimates. These passenger-less trips remain too uncertain to be estimated and included.

For example, by estimating at least one additional empty trip per motorized trip, a significantly higher number of new trips following the introduction of AV may be considered, namely an increase of at least 1,529,280 compared to the number of current daily trips. This value is obtained by multiplying the current number of daily



trips by the average of the increase in trips under the average scenario, assuming an unchanged occupancy rate (i.e. 18 %).

Overall, the results show that a 1% increase in the occupancy rate would result in an average decrease of 0.95% in car trips (between -1.04% and 0.88%, respectively, based on an occupancy rate between -4% and 14%). This suggests that carpool and car occupancy studies are also needed to better understand the impact of AV on car travel (Truong, 2017).

The analysis presented in the current paper is limited to the impacts of AV on the number of trips by car. The possible impacts of AV on the variation in kilometers traveled are also important, but have not been addressed. The focus was on the number of trips since the kilometers traveled depend on many uncertain factors such as the location of households. However, it is likely that increased car travel will also increase distance traveled, especially if the arrival of the AV leads to urban sprawl.

When estimating the new trips generated by AV, the possible new trip taken by people aged 16 to 65 whose driving conditions are restricted were not accounted for. This can be addressed in future work, assuming they can travel by AV as well as healthy drivers of the same age.

Additionally, it was hypothesized that PT would function similarly to today in terms of quality and quantity of service. This hypothesis should be improved in future research by integrating the effects of AV on PT. Despite the uncertainty surrounding this hypothesis, there is currently no choice but to apply it since these effects have not yet been studied separately.

### 3.8 External costs of motorized transportation

External transportation costs, such as pollution, are imposed onto third parties by users of transportation and are therefore not accounted for by users without government intervention (Maibach *et al.*, 2008). AV will certainly bring significant changes in the external transportation costs. In this context, we have thus attempted to estimate these costs grossly from the various sources of information available to date. Given the nature of the exercise, these estimates should not be used out of context.

With regard to the situation in Quebec, Transport Canada (2008) estimated the external costs of road transportation in Quebec in 2008 at \$7266 billion, which represents 20% of total costs (external and private costs). According to their estimates, accidents account for 54% (3294 billion) of these external costs, delays caused by congestion for 17.5% (1272 billion), air pollution for 16% (1162 billion), GHGs for 12% (872 billion) and noise pollution for 1% (73 billion). Table 3.8 outlines our estimates.

**Table 3.8 - External costs of motorized transportation (in billions of dollars, unless stated otherwise)**

	Transport Canada	Estimated decrease	Results (with 18% increase in trips)	Net variation
Accidents	3924	-50 % (Stephens <i>et al.</i> , 2016)	2315	-1609 (-41 %)
Congestion	1272	-60 % (Fagnant and Kockelman, 2015)	600	-672 (-53 %)
Air pollution	1162	-25 % (Fagnant and Kockelman, 2015)	1029	-133 (-13 %)
GHGs	872	n/a	1029	+157 (+18 %)
Noise pollution	73	n/a	86	+13 (+18 %)
<b>Total</b>	<b>7266</b>		<b>5059</b>	<b>-2207 (-30 %)</b>

According to our results, the average increase in motorized trips under the average scenario predicts an average increase of 18%. Thus, *ceteris paribus*, the external costs of road transport in Quebec could increase to \$ 8574 billion. However, AV can be expected to influence these costs by modifying the impacts of their various contributing causes.

For example, since the effectiveness of accident prevention in automated systems may continue to increase, Stephens *et al.* (2016) assume as an upper limit that partial

automation could reduce accidents by 50%. In Quebec, the external costs associated with accidents could therefore also be reduced by 50% to \$ 2315 billion when considering an increase of 18% in total motorized trips.

Also, Fagnant and Kockelman (2015) estimate that delays caused by congestion could decrease by 60% and fuel savings could reach 25% with an AV penetration rate of 90%. All other things being equal, these estimates would reduce the impact of delays and air pollution on external costs to \$600 billion and \$1029 billion respectively.

Finally, our literature review generally concluded that the effects on greenhouse gases and noise pollution are uncertain. We can also expect that GHG emissions and noise pollution would decrease significantly in the future since the advent of VA and electric vehicles is expected to occur simultaneously. Our study therefore only considers that the increase in trips and their value respectively reaches \$1029 and \$86 billion. In total, according to these estimates, external costs could decrease to a minimum of \$ 5059 billion. This represents a 30% decrease from 2008 estimates.

### 3.9 Conclusion

The purpose of this paper was to estimate the number of trips generated annually by the arrival of AV using a trip simulation model.

To evaluate a range of potential effects on motorized travel, a simulation model was built based on the potential variation in travel needs for different age categories and the modal shift of public and active transportation to AV. In regard to variations in

the number of drivers' licenses by age category, three possible scenarios were considered (namely low, medium and high). Variations were also applied to the average occupancy rate of vehicles (-5% to +14%). Overall, a total of 240 scenarios were evaluated. The results showed that AV have the potential to result in an overall average increase of 13% in daily commuting in Montreal. The medium scenario has variations from 2% to 26%, the low scenario from -2% to 22% and the high scenario from 5% to 31%. More specifically, if the car occupancy rate remains unchanged in the medium scenario, the new trips generated by AV could create a 16% increase in car travel. Additionally, travel would increase by 20%, including transfers from public and active transport to AV. These results suggest that the increase in car trips across the various scenarios would be caused mainly by new trips rather than by modal changes.

The analysis presented in this paper is limited to the impacts of AV on the number of trips by car. The possible impacts of AV on the variation of kilometers traveled are also important, but have not been addressed in this paper. The focus was instead on the number of trips, since the kilometers traveled depend on many uncertain factors such as the location of households. However, it is likely that an increase in the number of car trips also leads to an increase in kilometers driven.

Despite the large number of scenarios evaluated and the uncertainty in the data used, it is believed that this article contributes to the reflections of planners and decision-makers in order to maintain timely and informed regional plans based on potential increases in the number of AV. Planners, as well as the general public, must be careful not to expect this technology to solve traffic congestion, traffic accidents or pollution problems by itself. Indeed, this model predicts that AV are likely to

modestly increase vehicle trips. Additionally, increased travel time productivity could lead to increased peak hour congestion due to the reduced value of congestion avoidance.

This type of potential effect illustrates the limitations of this research. Indeed, despite a constant concern for the multiplier effects of AV variables, it is possible that, in the end, these effects have been underestimated or overestimated. Furthermore, in future research, other models might consider separating results by nature, by origin, and arrival of trips, since these variables could partly explain the effects of AV.

## CONCLUSION

À Montréal, les automobilistes passent en moyenne 53,8 minutes dans leur véhicule par jour pour aller et revenir du travail (Statistique Canada, 2012). Avec l'arrivée imminente des VA, le temps passé à bord des véhicules pourra être utilisé de manière bien différente. Que ce soit en se divertissant, en travaillant, ou simplement en admirant le paysage, la nature des déplacements motorisés se transformera au cours des prochaines années. Une démocratisation de ceux-ci est aussi à prévoir. En effet, de nouveaux groupes d'utilisateurs pourront maintenant voyager seuls en voiture, c'est-à-dire les jeunes, les personnes âgées et les personnes présentant des handicaps physiques. Simultanément, de nombreux accidents risquent d'être évités, sachant que les erreurs humaines sont à l'origine de la majorité des accidents.

Ainsi, à mesure que les coûts liés aux déplacements automobiles diminueraient, le nombre de déplacements risque d'augmenter. On peut aisément imaginer que ceci puisse entraîner une augmentation de la pollution, de la congestion et de l'étalement urbain. Toutefois, les effets sur la pollution et la congestion sont actuellement débattus, tandis que le risque lié à une croissance de l'étalement semble bien réel.

D'abord, les effets sur la consommation d'énergie sont incertains, mais la plupart des auteurs estiment qu'une économie d'énergie est le résultat le plus probable. L'automatisation complète entraînera probablement une diminution de la consommation d'énergie malgré l'augmentation des déplacements, principalement parce qu'elle a le potentiel d'influencer la conception des véhicules et les modes de conduite. Ensuite, la congestion accrue généralement associée à une augmentation

des déplacements pourrait ne pas se produire dans un scénario de VA étant donné l'efficacité des déplacements des VA et l'augmentation de la capacité des routes. Ainsi, comme pour les effets sur la consommation d'énergie, les effets sur la circulation sont incertains malgré l'augmentation probable des déplacements automobiles. Finalement, l'étalement urbain risque d'être appuyé par la diminution des coûts de déplacements et par l'aisance et le confort des déplacements en VA. La question demeure à savoir comment le gouvernement sera en mesure de gérer l'étalement et l'augmentation des déplacements. Il est donc important de mesurer l'ampleur de cette augmentation pour ensuite préparer efficacement l'arrivée des VA.

En ce sens, l'objectif du présent mémoire était d'établir une estimation du nombre de déplacements générés par l'arrivée des VA selon une automatisation complète à l'aide d'un modèle de simulation des déplacements appliqué à la RMR de Montréal. Une méthode d'estimation des déplacements générés par l'arrivée des VA selon les différents groupes d'âge a été proposée. Dans la méthode présentée, les nouveaux déplacements sont estimés en mesurant les écarts dans les besoins de déplacement des Montréalais selon leur catégorie d'âge. Différents scénarios ont été conçus avec différentes possibilités de transferts modaux des transports collectifs et actifs vers les VA, et différents taux d'occupation des voitures. 240 scénarios ont ainsi été estimés.

Les résultats montrent que les VA ont le potentiel d'entraîner une augmentation globale moyenne de 13 % des déplacements quotidiens à Montréal. Plus précisément, le groupe des 16 à 19 ans aurait la plus forte augmentation, soit 30 %, suivi du groupe des 65 ans et plus et du groupe des 20 à 24 ans avec des augmentations de 25 % et 8 %. Si le taux d'occupation de la voiture reste inchangé dans le scénario moyen, les nouveaux déplacements générés par les VA pourraient créer une augmentation de 16 %



des déplacements en voiture. Les déplacements augmenteraient de 20 % en incluant également les transferts des transports collectifs et actifs vers les VA.

Les résultats suggèrent aussi qu'une diminution de 1 % du taux d'occupation moyen des voitures entraînerait une augmentation moyenne de 0,95 % des déplacements en voiture. Nous croyons qu'il est probable que les taux d'occupation diminuent et, conséquemment, l'augmentation des déplacements pourrait être considérablement amplifiée.

Cependant, l'augmentation du taux d'occupation de la voiture est possible quoique peu probable. En effet, même si les VA partagés sont plus nombreux que nous l'avons estimé, les déplacements sans conducteur peuvent se produire en raison de la capacité des VA à se stationner et à embarquer des passagers par eux-mêmes et, ainsi, diminuer le taux d'occupation moyen des véhicules.

De plus, nous devons réitérer le fait que les déplacements sans passager peuvent avoir un impact significatif sur les résultats obtenus et grandement diminuer les avantages des VA. Il s'agit donc d'une estimation de la borne inférieure des déplacements. En effet, il existe une possibilité que les VA puissent voyager sans passagers pour aller se stationner ou pour aller récupérer un passager. Ces déplacements pourraient s'ajouter au nombre de déplacements induits par l'arrivée des VA, mais ne sont pas considérés dans la présente recherche puisque nous tentons de demeurer conservateurs dans notre analyse et ces circuits demeurent trop incertains pour être estimés et inclus.

L'analyse présentée dans notre recherche se limite aux impacts des VA sur le nombre de déplacements en voiture. Les impacts possibles des VA sur la variation des kilomètres parcourus sont également importants, mais n'ont pas été abordés dans le présent document. Nous nous concentrons sur le nombre de déplacements puisque les kilomètres parcourus dépendent d'un nombre important de facteurs incertains comme la localisation des ménages selon les niveaux d'automatisation. Toutefois, il est probable que l'augmentation du nombre de déplacements en voiture entraîne également une augmentation des kilomètres parcourus, notamment en raison de l'étalement urbain que pourrait entraîner l'arrivée des VA.

Lors de l'estimation des nouveaux déplacements générés par les VA, nous n'avons pas tenu compte des nouveaux déplacements possibles des personnes âgées de 16 à 65 ans dont les conditions de conduite sont restreintes. Il serait possible d'y remédier dans le cadre de futurs travaux en supposant qu'elles voyageraient avec des VA autant que des conducteurs en bonne santé du même âge.

Une de nos hypothèses suggère un fonctionnement des TC similaire à aujourd'hui au niveau de la qualité et de la quantité du service. Cette hypothèse devrait être revue dans des recherches futures en intégrant les effets des VA sur les TC. Malgré l'incertitude entourant cette hypothèse, nous n'avons actuellement d'autres choix que de tout de même l'émettre puisque ces effets n'ont pas encore été étudiés distinctement et sont complexes à estimer.

Malgré le grand nombre de scénarios évalués et l'incertitude des données utilisées, nous croyons que ce mémoire permet de contribuer aux réflexions des planificateurs et des décideurs dans le but de maintenir des plans régionaux opportuns et éclairés en

en fonction d'une éventuelle hausse du nombre de VA. Les planificateurs, ainsi que la population en général, doivent faire attention à ne pas s'attendre à ce que cette technologie résolve par elle-même les problèmes d'embouteillages, d'accidents de la circulation ou de pollution. En effet, notre modèle prédit que les VA sont susceptibles d'augmenter modestement les déplacements des véhicules. De plus, l'augmentation de la productivité des temps de déplacement pourrait entraîner une augmentation de la congestion aux heures de pointe étant donné la réduction de la valeur de l'évitement de la congestion.

Ce type d'effet potentiel illustre les limites de notre recherche. En effet, malgré notre souci constant des effets multiplicateurs des variables propres aux VA, il est possible que, au final, ces effets aient été sous-estimés ou surestimés. De plus, dans de futures recherches, nous pourrions considérer séparer les résultats selon la nature et selon l'origine et l'arrivée des déplacements puisque ces variables pourraient expliquer en partie les effets des VA.

Ainsi, le rôle du gouvernement et des planificateurs est primordial durant cette nouvelle ère de la mobilité. En effet, ils devront répondre à plusieurs questions pour une première fois. La position du gouvernement vis-à-vis le risque d'un étalement croissant des villes causé par les VA est notamment d'intérêt public. Simultanément, l'emplacement des stationnements pour les VA pourrait aussi jouer un rôle important dans l'utilisation de l'espace de Montréal. De plus, sauront-ils promouvoir efficacement l'autopartage, le covoiturage, les TC et les TA pour tenter de diminuer le nombre de véhicules et la quantité de déplacements automobiles ?

Il est possible que ce soit difficile pour ceux-ci d'être proactif vis-à-vis ce changement puisque l'on n'arrive pas à prévoir avec exactitude le sens et l'ampleur de l'impact. En effet, la plupart de ces impacts risquent d'apparaître seulement lorsque les VA deviendront courants, soit probablement entre 2040 et 2060 (Litman, 2017). Les ajustements seront ainsi possibles au fil du temps et selon les effets engendrés par l'arrivée progressive des VA.

ANNEXE A

DÉTAILS DU SCÉNARIO BAS

		$\alpha_{OM}$									
$\alpha_{TC}$	$\alpha_{TA}$	-0,05	-0,04	-0,03	-0,02	-0,01	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04
0%	0%	18%	16%	15%	14%	13%	12%	11%	10%	8%	7%
0%	10%	19%	18%	17%	16%	14%	13%	12%	11%	10%	8%
8,5%	0%	20%	19%	18%	17%	15%	14%	13%	12%	11%	10%
8,5%	10%	22%	21%	19%	18%	17%	16%	15%	14%	13%	11%
$\alpha_{TC}$	$\alpha_{TA}$	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14
0%	0%	6%	5%	4%	3%	2%	2%	1%	0%	-1%	-2%
0%	10%	8%	7%	6%	5%	4%	3%	2%	1%	0%	-1%
8,5%	0%	9%	8%	7%	6%	5%	4%	3%	2%	1%	0%
8,5%	10%	10%	9%	8%	7%	6%	5%	4%	3%	3%	2%

## ANNEXE B

### DÉTAILS DU SCÉNARIO MOYEN

		$\alpha_{OM}$									
$\alpha_{TC}$	$\alpha_{TA}$	-0,05	-0,04	-0,03	-0,02	-0,01	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04
0%	0%	22%	21%	20%	18%	17%	16%	15%	14%	13%	11%
0%	10%	24%	22%	21%	20%	19%	18%	16%	15%	14%	13%
8,5%	0%	25%	23%	22%	21%	20%	19%	17%	16%	15%	14%
8,5%	10%	26%	25%	24%	23%	21%	20%	19%	18%	17%	15%
$\alpha_{TC}$	$\alpha_{TA}$	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14
0%	0%	10%	9%	8%	7%	6%	5%	4%	3%	3%	2%
0%	10%	12%	11%	10%	9%	8%	7%	6%	5%	4%	3%
8,5%	0%	13%	12%	11%	10%	9%	8%	7%	6%	5%	4%
8,5%	10%	14%	13%	12%	11%	10%	9%	8%	7%	6%	5%

## ANNEXE C

### DÉTAILS DU SCÉNARIO ÉLEVÉ

		$\alpha_{DM}$									
$\alpha_{TC}$	$\alpha_{TA}$	-0,05	-0,04	-0,03	-0,02	-0,01	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04
0%	0%	26%	25%	24%	23%	21%	20%	19%	18%	17%	15%
0%	10%	28%	27%	25%	24%	23%	22%	20%	19%	18%	17%
8,5%	0%	29%	28%	27%	25%	24%	23%	22%	20%	19%	18%
8,5%	10%	31%	29%	28%	27%	26%	24%	23%	22%	21%	20%
$\alpha_{TC}$	$\alpha_{TA}$	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14
0%	0%	14%	13%	12%	11%	10%	9%	8%	7%	6%	5%
0%	10%	16%	15%	14%	13%	12%	11%	10%	9%	8%	7%
8,5%	0%	17%	16%	15%	14%	13%	12%	11%	10%	9%	8%
8,5%	10%	18%	17%	16%	15%	14%	13%	12%	11%	10%	9%

## ANNEXE D

### NOMBRE DE TITULAIRES D'UN PERMIS DE CONDUIRE OU D'UN PERMIS PROBATOIRE SELON L'ÂGE ET LES RÉGIONS ADMINISTRATIVES

Région admin.	Montréal		Laval		Lanaudière (55%)		Laurentides (51%)		Montérégie (60%)	
	Nombre de titulaires d'un permis									
	2013	2017	2013	2017	2013	2017	2013	2017	2013	2017
16-19 ans	14243	12827	6 239	5 579	5696	4706	6744	5751	18761	16280
20-24 ans	65621	64159	19 404	19 044	12875	12226	14844	14368	44055	41612
25-34 ans	191641	195329	40 187	40 766	26681	27048	29954	31542	92823	93548
35-44 ans	200918	212795	51 620	51 065	30583	31877	36153	37168	108837	114128
45-54 ans	205758	199648	59 860	58 267	37455	34271	45778	42523	130007	120357
55-64 ans	167036	177494	44 298	50 669	32862	36838	39449	45416	113847	124334
65 et plus	157163	179066	27 765	31 282	20234	24667	25061	30594	74612	88165
Total	1002380	1041318	249373	256672	166385	171633	197983	207361	582942	598424



## ANNEXE E

NOMBRE DE TITULAIRES D'UN PERMIS DE CONDUIRE, POPULATION ET  
POURCENTAGE DE DÉTENTIONS DANS LA RMR DE MONTRÉAL SELON  
L'ÂGE

	RMR de Montréal					
	<i>Nombre de permis</i>		<i>Population</i>		<i>Pourcentage</i>	
	2013	2017	2013	2017	2013%	2017%
16-19 ans	51 682	45 143	192 610	173 857	26,83%	25,97%
20-24 ans	156 799	151 408	282 532	278 989	55,50%	54,27%
25-34 ans	381 286	388 233	578 862	593 727	65,87%	65,39%
35-44 ans	428 111	447 033	570 325	606 501	75,06%	73,71%
45-54 ans	478 857	455 066	594 786	574 352	80,51%	79,23%
55-64 ans	397 492	434 751	484 413	528 737	82,06%	82,22%
65 et plus	304 836	353 773	597 391	672 973	51,03%	52,57%
Total	2 199 063	2 275 408	3 300 919	3 429 136	66,62%	66,36%

## RÉFÉRENCES

- AECOM (2010). Portrait des émissions de gaz à effet de serre sur le territoire de la Communauté métropolitaine de Montréal. Pour la Communauté métropolitaine de Montréal. Récupéré de [http://cmm.qc.ca/fileadmin/user\\_upload/documents/20100922\\_rapportTecsult\\_GES.pdf](http://cmm.qc.ca/fileadmin/user_upload/documents/20100922_rapportTecsult_GES.pdf), consulté le 26 septembre 2018.
- Arbib, J. & Seba, T. (2017). Rethinking Transportation 2020–2030: The Disruption of Transportation and the Collapse of the Internal-Combustion Vehicle and Oil Industries. *RethinkX California*, US.
- Anderson, J. M., Nidhi, K., Stanley, K. D., Sorensen, P., Samaras, C. & Oluwatola, O. A. (2014). Autonomous vehicle technology: A guide for policymakers. Rand Corporation.
- Arnaout, G. & Arnaout, J.-P. (2014). Exploring the effects of cooperative adaptive cruise control on highway traffic flow using microscopic traffic simulation. *Transportation Planning and Technology*, 37(2), 186–199.
- Australian Bureau of Statistics. (2017). 2016 Census: Victoria. Récupéré de <http://www.abs.gov.au/ausstats/abs@.nsf/MediaReleasesByCatalogue/C508D213FD43EA7CA258148000C6BBE?OpenDocument>, consulté le 8 juin 2018.
- Bansal, P. & Kockelman, K. M. (2017). Forecasting Americans' long-term adoption of connected and autonomous vehicle technologies. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 95, 49-63.
- Bart, I. L. (2010). Urban sprawl and climate change: A statistical exploration of cause and effect, with policy options for the EU. *Land use policy*, 27(2), 283-292.
- Becker, U. J., Becker, T. & Gerlach, J. (2017). The True Costs of Automobility: External Costs of Cars Overview on existing estimates in EU-27.

- Bierstedt, J., Gooze, A., Gray, C., Peterman, J., Raykin, L. & Walters, J. (2014). Effects of next-generation vehicles on travel demand and highway capacity. *FP Think Working Group*, 10-11.
- Bonnefon, J. F., Shariff, A & Rahwan, I. (2016). The social dilemma of autonomous vehicles. *Science*, 352 (6293), 1573-1576.
- Brueckner, J. K., Mills, E. & Kremer, M. (2001). Urban sprawl: Lessons from urban economics [with comments]. *Brookings-Wharton papers on urban affairs*, 65-97.
- CAA Québec. (2013). Coûts d'utilisation d'une automobile, Au-delà de l'étiquette de prix : Comprendre les dépenses liées au véhicule. Récupéré de [https://www.caaquebec.com/fileadmin/documents/PDF/Sur\\_la\\_route/Couts\\_utilisation/2013\\_CAA\\_Driving\\_Costs\\_French.pdf](https://www.caaquebec.com/fileadmin/documents/PDF/Sur_la_route/Couts_utilisation/2013_CAA_Driving_Costs_French.pdf), consulté le 9 septembre 2018.
- Camagni, R., Gibelli, M. C. & Rigamonti, P. (2002). Urban mobility and urban form: the social and environmental costs of different patterns of urban expansion. *Ecological economics*, 40(2), 199-216.
- Cavoli, C., Phillips, B., Cohen, T. & Jones, P. (2017). Social and behavioural questions associated with Automated Vehicles A Literature Review. *UCL Transport Institute*, January.
- Childress, S., Nichols, B., Charlton, B. & Coe, S. (2015). Using an activity-based model to explore the potential impacts of automated vehicles. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, (2493), 99-106.
- Clements, L. M. & Kockelman, K. M. (2017). Economic Effects of Automated Vehicles. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, (2606), 106-114.
- Codère, J.-F. (2018, 2 février). Montréal veut des voitures autonomes dans ses rues. *La Presse*. Récupéré de [http://auto.lapresse.ca/auto-ecolo/201802/02/01-5152365-montreal-veut-des-voitures-autonomes-dans-ses-rues.php?utm\\_categorieinterne=traffidivers&utm\\_contenuinterne=envoyer\\_1pa](http://auto.lapresse.ca/auto-ecolo/201802/02/01-5152365-montreal-veut-des-voitures-autonomes-dans-ses-rues.php?utm_categorieinterne=traffidivers&utm_contenuinterne=envoyer_1pa), consulté le 7 septembre 2018.

- Communauté métropolitaine de Montréal (CMM). (2016). Portrait du Grand Montréal Édition 2016. Récupéré de [http://cmm.qc.ca/fileadmin/user\\_upload/periodique/cahiersMetropolitains\\_no\\_05.pdf](http://cmm.qc.ca/fileadmin/user_upload/periodique/cahiersMetropolitains_no_05.pdf), consulté le 8 juillet 2018.
- Cui, S., Seibold, B., Stern, R. & Work, D. B. (2017). Stabilizing traffic flow via a single autonomous vehicle: Possibilities and limitations. In Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2017 IEEE (pp. 1336-1341). IEEE.
- Dang, R., Wang, J., Li, S. E. & Li, K. (2015). Coordinated adaptive cruise control system with Lane-Change assistance. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16 (5), 2373–2383.
- De Vos, J. & Witlox, F. (2013). Transportation policy as spatial planning tool ; reducing urban sprawl by increasing travel costs and clustering infrastructure and public transportation. *Journal of transport geography*, 33, 117-125.
- EXO (2019). Enquête OD 2013. Récupéré de <https://exo.quebec/Media/Default/pdf/section8/enquete-od-2013-faits-saillants.pdf>, consulté le 2 janvier 2019.
- Fagnant, D. J. & Kockelman, K. (2015). Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 77, 167-181.
- Fagnant, D. J. & Kockelman, K. M. (2016). Dynamic ride-sharing and fleet sizing for a system of shared autonomous vehicles in Austin, Texas. *Transportation*, 1-16.
- Fernandes, P. & Nunes, U. (2012). Platooning with IVC-enabled autonomous vehicles: Strategies to mitigate communication delays, improve safety and traffic flow. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13 (1), 91-106.
- Folsom, T. C. (2011). Social ramifications of autonomous urban land vehicles. In *Technology and Society (ISTAS)*, 2011 IEEE International Symposium on (pp. 1-6). IEEE.

- Freund, P. & Martin, G. (2009). The social and material culture of hyperautomobility: "Hyperauto". *Bulletin of Science, Technology & Society*, 29(6), 476-482.
- García-Palomares, J. C. (2010). Urban sprawl and travel to work: the case of the metropolitan area of Madrid. *Journal of Transport Geography*, 18(2), 197-213.
- Gasser, T. M. & Westhoff, D. (2012). BASt-study: Definitions of automation and legal issues in Germany. In Proceedings of the 2012 Road Vehicle Automation Workshop.
- Gibbs, S. (2017, 20 novembre). Uber plans to buy 24,000 autonomous Volvo SUVs in race for driverless future. The Guardian. Récupéré de <https://www.theguardian.com/technology/2017/nov/20/uber-volvo-suv-self-driving-future-business-ride-hailing-lyft-waymo>, consulté le 7 septembre 2018.
- Gill, V., Kirk, B., Godsmark, P. & Flemming, B. (2015). Automated vehicles: The coming of the next disruptive technology. In Report, Conference Board of Canada, Ottawa.
- Goodall, N. (2014). Ethical decision making during automated vehicle crashes. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, (2424), 58-65.
- Google. (2018). Waymo Journey. Récupéré de <https://waymo.com/journey/>, consulté le 7 novembre 2018.
- Guerra, E. (2016). Planning for cars that drive themselves: Metropolitan Planning Organizations, regional transportation plans, and autonomous vehicles. *Journal of Planning Education and Research*, 36(2), 210-224.
- Habibi, S. & Asadi, N. (2011). Causes, results and methods of controlling urban sprawl. *Procedia Engineering*, 21, 133-141.
- Hanson, S., 2004, The context of urban travel: Concepts and recent trends. In S. Hanson and G. Giuliano, editors, *The Geography of Urban Transportation* (3rd edition). New York, NY : Guildford Press, 3-29.
- Harper, C., Hendrickson, C. T., Mangones, S. & Samaras, C. (2016). Estimating potential increases in travel with autonomous vehicles for the non-driving,

elderly and people with travel-restrictive medical conditions. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 72, 1–9

- Heinrichs, D. & Cyganski, R. (2015). Automated Driving: How It Could Enter Our Cities and How This Might Affect Our Mobility Decisions. *Transportation Planning Review*, 51(2), 74-79.
- Howard, D. & Dai, D. (2014). Public perceptions of self-driving cars: The case of Berkeley, California. In *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting* (Vol. 14, No. 4502).
- Igliński, H. & Babiak, M. (2017). Analysis of the potential of autonomous vehicles in reducing the emissions of greenhouse gases in road transport. *Procedia engineering*, 192, 353-358.
- Institut de la statistique du Québec. (2014). Regard statistique sur la jeunesse — État et évolution de la situation des Québécois âgés de 15 à 29 ans 1996 à 2012. Récupéré de <http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/conditions-vie-societe/regard-jeunesse.pdf>, consulté le 10 septembre 2018.
- Institut de la statistique du Québec. (2017). Portrait des jeunes Québécois sur le marché du travail en 2016. Récupéré de <http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/travail-remuneration/bulletins/cap-remuneration-201712-9.pdf>, consulté le 10 septembre 2018.
- International Transport Forum. (2015). *Urban mobility: System upgrade*. Paris : OECD/International Transport Forum
- Johnson, C. & Walker, J. (2016). *Peak Car Ownership; The Market Opportunity Of Electric Automated Mobility Services*. Rocky Mountain Institute and Mobility Transformation.
- Kasseris, E. P. (2006). *Comparative analysis of automotive powertrain choices for the near to mid-term future* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- Khondaker, B. & Kattan, L. (2015). Variable speed limit : A microscopic analysis in a connected vehicle environment. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 58, 146-159.

- KPMG. (2015). The Clockspeed Dilemma: What Does It Mean for Automotive Innovation?. Récupéré de <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/pdf/2016/04/auto-clockspeed-dilemma.pdf>, consulté le 30 mai 2018.
- Kyriakidis, M., Happee, R. & de Winter, J. C. (2015). Public opinion on automated driving : Results of an international questionnaire among 5000 respondents. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 32, 127-140.
- Lange, R., Kelly, S., Senatore, C., Wilson, J., Yee, R. & Harrington, R. (2017). Data Requirements for Post-Crash Analyses of Collisions Involving Collision Avoidance Technology Equipped, Automated, and Connected Vehicles. In 25th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV) National Highway Traffic Safety Administration.
- Li, J. M. & Gao, Z. (2013). Exploring the impact of speed synchronization through connected vehicle technology on fleet-level fuel economy. *SAE International journal of passenger cars-electronic and electrical systems*, 6(2013-01-0617), 213-221.
- Litman, T. (2017). Autonomous vehicle implementation predictions. Victoria Transport Policy Institute, 28.
- MacKenzie, D., Wadud, Z. & Leiby, P. (2014, January). A first order estimate of energy impacts of automated vehicles in the United States. In *Transportation research board annual meeting* (Vol. 93).
- Maibach, M., Schreyer, C., Sutter, D., Van Essen, H. P., Boon, B. H., Smokers, R., ... & Bak, M. (2008). Handbook on estimation of external costs in the transport sector. CE Delft.
- Milakis, D., Van Arem, B. & Van Wee, B. (2017). Policy and society related implications of automated driving: a review of literature and directions for future research. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 21(4), 324-348.
- Milanés, V., Shladover, S. E., Spring, J., Nowakowski, C., Kawazoe, H. & Nakamura, M. (2014). Cooperative adaptive cruise control in real traffic situations. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15 (1), 296-305.

- Millard-Ball, A. (2016). Pedestrians, Autonomous Vehicles, and Cities. *Journal of Planning Education and Research*, 0739456X16675674.
- Ministère des Transports du Québec. (2017). Bilan de l'état des chaussées DU RÉSEAU ROUTIER SUPÉRIEUR QUÉBÉCOIS 2016. Récupéré de <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/entreprises-partenaires/entreprises-reseaux-routier/chaussees/Documents/bilan-chaussees.pdf>, consulté le 25 septembre 2018.
- Mosquet, X., Dauner, T., Lang, N., Rübmann, M., Mei-Pochtler, A., Agrawal, R. & Schmiege, F. (2015). Revolution in the driver's seat: The road to autonomous vehicles. Boston Consulting Group, 20.
- Murray, A. T. (2001). Strategic analysis of public transport coverage. *Socio-Economic Planning Sciences*, 35 (3), 175-188.
- National Highway Traffic Safety Administration. (2013). Preliminary statement of policy concerning automated vehicles. Washington, DC, 1-14.
- NHTSA. (2016). NHTSA Data Shows Traffic Deaths up 7.7 Percent in 2015. Récupéré de <https://www.nhtsa.gov/press-releases/nhtsa-data-shows-traffic-deaths-77-percent-2015>, consulté le 21 juin 2018.
- Office de l'efficacité énergétique (OEE). (2012). Rapport d'étape de l'Enquête sur les véhicules au Canada, 2008. Récupéré de <http://oee.nrcan.gc.ca/publications/statistiques/evc08/chapitre2.cfm?attr=0>, consulté le 12 juillet 2018.
- Porter, C. D., Brown, A., DeFlorio, J., McKenzie, E., Tao, W. & Vimmerstedt, L. (2013). Effects of travel reduction and efficient driving on transportation: Energy use and greenhouse gas emissions (No. DOE/GO-102013-3704).
- Programme conjoint du Collège des médecins du Québec et de la Société de l'assurance automobile du Québec. (2013). L'évaluation médicale de l'aptitude à conduire un véhicule automobile. Récupéré de <http://www.cmq.org/pdf/ateliers-dae/atelier-aptitude-conduire-cahier-participant.pdf>, consulté le 15 septembre 2018.



- Public Transport Victoria. Research and statistics. (s. d.). Network Statistics. Récupéré de <https://www.ptv.vic.gov.au/about-ptv/data-and-reports/research-and-statistics>, consulté le 21 juin 2018.
- Ross, C. & Guhathakurta, S. (2017). Autonomous Vehicles and Energy Impacts: A Scenario Analysis. *Energy Procedia*, 143, 47-52.
- SAAQ. (2018a). Bilan 2017 — Dossier statistique. Accidents, Parc automobile, Permis de conduire. Récupéré de [http://www.bdso.gouv.qc.ca/docs-ken/multimedia/PB05300FR\\_BilanStatistique2017A00F00.pdf](http://www.bdso.gouv.qc.ca/docs-ken/multimedia/PB05300FR_BilanStatistique2017A00F00.pdf), consulté le 5 septembre 2018.
- SAAQ. (2018b). Clientèles — Jeunes AUTO ET MOTO : COMMENT OBTENIR UN PREMIER PERMIS DE CONDUIRE. Récupéré de <https://saaq.gouv.qc.ca/securite-routiere/clienteles/jeunes/premier-permis-conduire/>, consulté le 20 septembre 2018.
- Santos, A., McGuckin, N., Nakamoto, H. Y., Gray, D. & Liss, S. (2011). Summary of travel trends: 2009 national household travel survey (No. FHWA-PL-II-022).
- Schoettle, B. & Sivak, M. (2014). Public opinion about self-driving vehicles in China, India, Japan, the US, the UK, and Australia.
- Shepardson, D. et Lienert, P. (2016, 9 février). Exclusive : In boost to self-driving cars, U.S. tells Google computers can qualify as drivers. Reuters. Récupéré de <https://www.reuters.com/article/us-alphabet-autos-selfdriving-exclusive/exclusive-in-boost-to-self-driving-cars-u-s-tells-google-computers-can-qualify-as-drivers-idUSKCN0VJ00H>, consulté le 22 septembre 2018.
- Smith, B. W. (2012). Managing autonomous transportation demand. *Santa Clara L. Rev.*, 52, 1401.
- Smith, B. W. (2013). SAE levels of driving automation. Center for Internet and Society. Stanford Law School. <http://cyberlaw.stanford.edu/blog/2013/12/sae-levels-drivingautomation>.
- Soteropoulos, A., Berger, M. & Ciari, F. (2019). Impacts of automated vehicles on travel behaviour and land use: an international review of modelling studies. *Transport Reviews*, 39 (1), pp. 29-49.

- Statistique Canada. (2001). Série analytique du recensement de 2001 — Profil de la population canadienne selon l'âge et le sexe : le Canada vieillit. Récupéré de <http://publications.gc.ca/Collection/Statcan/96F0030X/96F0030XIF2001002.pdf>, consulté le 16 septembre 2018.
- Statistique Canada. (2012). Enquête nationale auprès des ménages de 2011, produit numéro 99-012-X2011031 au catalogue de Statistique Canada. Récupéré de <https://www12.statcan.gc.ca/nhs-enm/2011/dp-pd/dt-td/Rp-fra.cfm?LANG=F&APATH=3&DETAIL=0&DIM=0&FL=A&FREE=0&GC=0&GID=0&GK=0&GRP=1&PID=105619&PRID=0&PTYPE=105277&S=0&SHOWALL=0&SUB=0&Temporal=2013&THEME=96&VID=0&VNAMEE=&VNAMEF=>, consulté le 13 octobre 2018.
- Statistique Canada. (2016). Explorateur du revenu total, Recensement de 2016. Récupéré de <http://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2016/dp-pd/dv-vd/inc-rev/index-fra.cfm>, consulté le 2 octobre 2018.
- Statistique Canada. (2017a). Recensement de la population de 2016, produit numéro 98-400-X2016322 au catalogue de Statistique Canada. Récupéré de <http://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2016/dp-pd/prof/index.cfm?Lang=E>, consulté le 2 octobre 2018.
- Statistique Canada. (2017b). Nombre d'élèves dans les programmes réguliers pour les jeunes des écoles publiques primaires et secondaires selon l'âge et le sexe, Canada, provinces et territoires. Récupéré de <http://www5.statcan.gc.ca/cansim/a47>, consulté le 16 septembre 2018.
- Statistique Canada (2018), Enquête sur la population active, 2017, adapté par l'Institut de la statistique du Québec (ISQ), récupéré de [http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/travail-remuneration/groupes-populationnels/ages-retraites/trav\\_ages.html](http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/travail-remuneration/groupes-populationnels/ages-retraites/trav_ages.html), consulté le 2 octobre 2018.
- Stephens, T. S., Gonder, J., Chen, Y., Lin, Z., Liu, C. & Gohlke, D. (2016). Estimated bounds and important factors for fuel use and consumer costs of connected and automated vehicles (No. NREL/TP-5400-67216). National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States).

- STM (2011) Plan stratégique 2020. Tiré de [https://www.stm.info/sites/default/files/pdf/en/a-plan\\_strategique2020.pdf](https://www.stm.info/sites/default/files/pdf/en/a-plan_strategique2020.pdf), consulté le 1<sup>er</sup> juin 2018.
- Talebpour, A. & Mahmassani, H. S. (2016). Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 71, 143-163.
- Tanguay, G. A. & Gingras, I. (2011). Gas prices variations and urban sprawl: An empirical analysis of the 12 largest Canadian metropolitan areas.
- Transport Canada. (2008). Estimations de la totalité des coûts du transport au Canada. Récupéré de <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/0977506.pdf>, consulté le 21 octobre 2018.
- Transports Québec, Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports. (2017). Tableau synoptique des enquêtes origine-destination les plus récentes. Récupéré de <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/Planification-transports/enquetes-origine-destination/Documents/tableau-synoptique-recentes.pdf>, consulté le 13 octobre 2018.
- Trommer, S., Kolarova, V., Frädrich, E., Kröger, L., Kickhöfer, B., Kuhnimhof, T.,... & Phleps, P. (2016). Autonomous Driving-The Impact of Vehicle Automation on Mobility Behaviour. *Institute of Transport Research*
- Truong, L. T., De Gruyter, C., Currie, G. & Delbosc, A. (2017). Estimating the Trip Generation Impacts of Autonomous Vehicles on Car Travel in Victoria, Australia (No. 17-00317).
- Uber. (2018). Learning from the past to move forward. Récupéré de <https://medium.com/@UberATG/learning-from-the-past-to-move-forward-f4af566f2c3?source>, consulté le 2 janvier 2019.
- Uhlemann, Elisabeth. « Active Safety Vehicles Evolving Toward Automated Driving [Connected Vehicles]. » *IEEE Vehicular Technology Magazine* 10, no. 4 (2015): 20-23.

- Van Arem, B., Van Driel, C. J. & Visser, R. (2006). The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 7 (4), 429-436.
- VicRoads. (2016). Types of roads. Récupéré de <https://www.vicroads.vic.gov.au/traffic-and-road-use/road-network-and-performance/types-of-roads>, consulté le 2 juillet 2018.
- Ville de Montréal. (2017). Véhicules autonomes : de la connectivité sans fil à l'assurance automobile du futur pour faire rayonner Montréal. Récupéré de <https://ville.montreal.qc.ca/idmtl/vehicules-autonomes-de-la-connectivite-sans-fil-a-lassurance-automobile-du-futur-pour-faire-rayonner-montreal/>, consulté le 5 octobre 2018.
- Vivre en Ville. (s.d.). IMPACT DE LA LOCALISATION DES ACTIVITÉS SUR LES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE. *Collectivitesviables.org*, Vivre en Ville. Récupéré de <http://collectivitesviables.org/etudes-de-cas/impact-de-la-localisation-des-activites-sur-les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre.aspx>, consulté le 5 octobre 2018.
- Wadud, Z., MacKenzie, D. & Leiby, P. (2016). Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 86, 1-18.
- Wu, C., Zhao, G. & Ou, B. (2011). A fuel economy optimization system with applications in vehicles with human drivers and autonomous vehicles. *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, 16(7), 515-524.
- Yap, M. D., Correia, G. & Van Arem, B. (2016). Preferences of travellers for using automated vehicles as last mile public transport of multimodal train trips. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 94, 1-16.
- Young, M., Tanguay, G. A. & Lachapelle, U. (2016). Transportation costs and urban sprawl in Canadian metropolitan areas. *Research in Transportation Economics*, 60, 25-34.
- Zakharenko, R. (2016). Self-Driving cars will change cities. *Regional Science and Urban Economics*, 61, 26-37.

Zhang, W., Guhathakurta, S., Fang, J. & Zhang, G. (2015). Exploring the impact of shared autonomous vehicles on urban parking demand: An agent-based simulation approach. *Sustainable Cities and Society*, 19, 34-45.

Zohdy, I. H. & Rakha, H. A. (2016). Intersection management via vehicle connectivity : The intersection cooperative adaptive cruise control system concept. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 20 (1), 17-32.