

# Chaire Mobilité

*Chaire de recherche sur l'évaluation et la mise  
en œuvre de la durabilité en transport*

## Rapport d'activités 2019



# Chaire Mobilité

*Chaire de recherche sur l'évaluation et la mise en œuvre de la durabilité en transport*

## Rapport d'activités 2019

---

### *Titulaire*

---

Pr Catherine Morency, ing., Ph.D.,  
Département des génies civil, géologique et des mines  
Polytechnique Montréal

---

### *Équipe de recherche*

---

Hubert Verreault, Jean-Simon Bourdeau, Pierre-Léo Bourbonnais, Brigitte Milord – associés de recherche  
Plusieurs étudiant-e-s de doctorat, maîtrise et baccalauréat

---

### *Partenaires*

---

Ville de Montréal  
Autorité régionale de transport métropolitain  
Ministère des transports  
Société de transport de Montréal  
Exo (Réseau de transport métropolitain)

*Octobre 2020*

*Le présent rapport témoigne des activités de recherche et développement de la Chaire Mobilité. Les résultats, analyses et constats présentés sont la seule responsabilité de la Chaire et n'engagent pas les partenaires. On ne peut présumer, non plus, que ceux-ci partagent les conclusions qui sont tirées.*

**Citation préférée:** Chaire Mobilité (2020). Rapport d'activités 2019, Polytechnique Montréal, 98 pages.

# Table des matières

## Contents

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Introduction.....  | 1  |
| 1.1   | Mission générale de la Chaire Mobilité.....  | 1  |
| 1.2   | Structure organisationnelle.....   | 2  |
| 1.2.1 | Partenaires .....  | 2  |
| 1.2.2 | Collaborateurs .....   | 2  |
| 1.2.3 | Comité scientifique.....   | 3  |
| 1.3   | Programme de recherche.....  | 3  |
| 1.4   | Contenu du rapport.....  | 4  |
| 2     | Activités de recherche.....  | 5  |
| 2.1   | Maîtrises complétées en 2019 .....   | 5  |
| 2.2   | Méthodologie d'évaluation du partage spatiotemporel de la rue.....   | 6  |
| 2.2.1 | Introduction.....  | 6  |
| 2.2.1 | Objectifs.....   | 6  |
| 2.2.2 | Revue de la littérature.....   | 7  |
| 2.2.3 | Méthodologie .....   | 7  |
| 2.2.4 | Prototypage d'un outil de mesure de l'espace-temps.....  | 8  |
| 2.2.5 | Conclusion .....   | 11 |
| 2.3   | Dépendance à l'automobile .....  | 13 |
| 2.3.1 | Introduction.....  | 13 |
| 2.3.2 | Objectifs et contributions attendues .....   | 14 |
| 2.3.3 | Revue de littérature.....  | 14 |
| 2.3.4 | Méthodologie pour la première contribution.....  | 22 |
| 2.3.5 | Aperçu des tendances de motorisation .....   | 25 |
| 2.4   | Modélisation des interactions entre les modes de transport par l'intégration de sources diversifiées de données..... | 27 |
| 2.4.1 | Introduction.....  | 27 |
| 2.4.2 | Problématiques .....   | 27 |
| 2.4.3 | Objectifs.....   | 28 |
| 2.4.4 | Revue de littérature sur l'intégration de données .....  | 28 |
| 2.4.5 | Méthodologie .....   | 29 |
| 2.4.6 | Résultats préliminaires .....  | 33 |
| 2.4.7 | Conclusion .....   | 36 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 2.5   | Confort à bord des véhicules de transport en commun .....                                 | 37 |
| 2.5.1 | Introduction.....   | 37 |
| 2.5.2 | Revue de littérature.....   | 37 |
| 2.5.3 | Diagnostic du confort à bord des autobus de la STM .....                                  | 38 |
| 2.5.4 | Enquête sur les préférences de confort .....  | 40 |
| 2.5.5 | Conclusion .....  | 45 |
| 2.6   | Méthodologie de développement de cycles de conduite.....                                  | 46 |
| 2.6.1 | Introduction.....   | 46 |
| 2.6.1 | Revue de littérature.....   | 46 |
| 2.6.2 | Méthodologie .....  | 48 |
| 2.6.3 | Résultats .....   | 57 |
| 2.6.4 | Conclusions.....  | 58 |
| 2.7   | Perspectives sur l'utilisation du réseau routier et la capacité globale d'une ville ..... | 60 |
| 2.7.1 | Introduction.....   | 60 |
| 2.7.2 | État des connaissances.....   | 61 |
| 2.7.3 | Méthodologie .....  | 63 |
| 2.7.4 | Résultats .....   | 65 |
| 2.7.5 | Conclusion .....  | 72 |
| 2.8   | Guide d'utilisation de Traclus-DL.....  | 73 |
| 2.8.1 | Mise en contexte .....  | 73 |
| 2.8.2 | Utilisation de TraClus-DL .....   | 73 |
| 2.8.3 | Analyse du temps d'exécution de TraClus-DL .....  | 76 |
| 2.8.4 | Choix des paramètres de TraClus-DL.....   | 80 |
| 2.8.5 | Perspectives.....   | 81 |
| 2.9   | Calibration des temps de parcours de lignes de bus.....                                   | 82 |
| 2.9.1 | Introduction.....   | 82 |
| 2.9.2 | Analyse comparative des temps de parcours des lignes de bus de différents réseaux<br>82   |    |
| 2.9.3 | Conclusions et limitations .....  | 85 |
| 3     | Rayonnement .....   | 86 |
| 3.1   | Publications (2019).....  | 86 |
| 3.2   | Principales participations à des congrès.....   | 86 |
| 3.2.1 | Congrès annuel du Transportation research board 2019 .....                                | 86 |
| 3.2.2 | Congrès annuel de l'Association québécoise des transports 2019 .....                      | 86 |
| 3.2.3 | 2e Rencontres Francophones Transport Mobilité 2019 - Montréal .....                       | 86 |

|       |                            |    |
|-------|----------------------------|----|
| 3.2.4 | Autres présentations ..... | 87 |
| 4     | Références .....           | 88 |

# Liste des figures

|   |    |
|---|----|
| Figure 1. Représentation schématique du programme de recherche de la Chaire Mobilité .....  | 4  |
| Figure 2. Partage de la surface de rue selon les usagers ou groupes d'usagers .....   | 10 |
| Figure 3. Distribution spatiale des types de rues .....   | 11 |
| Figure 4. Schéma méthodologique préliminaire de la première contribution .....  | 23 |
| Figure 5. Taux de motorisation 2000 et 2017. Source : Le nombre de véhicules de promenade provient des données de la SAAQ (2018a) et les estimations de population de Statistique Canada (2018). Calcul par les auteurs. .... | 25 |
| Figure 6. Motorisation mesurée en véhicules de promenade par 1 000 adultes par région administrative. 2000-2017. Sources : SAAQ (2018b) et Statistique Canada (2018). ....  | 26 |
| Figure 7. Services de transport à l'intérieur de la zone de desserte A11.....   | 30 |
| Figure 8. Cadre méthodologique.....   | 31 |
| Figure 9. Méthode d'expansion de l'enquête Origine-Destination.....   | 32 |
| Figure 10. Courbes enveloppes de la mobilité calculées à partir des enquêtes Origine-Destination 2008 et 2013.....  | 34 |
| Figure 11. Courbes enveloppes par mode de transport calculées à partir de trois bases de données (enquête OD 2008, enquête OD 2013 et données passives de 2016) .....   | 34 |
| Figure 12. Périodogramme de l'utilisation des 68 stations de métro de Montréal mesurée à partir des données de cartes à puce .....  | 35 |
| Figure 13. Probabilité d'une place assise pour la période de pointe du matin.....   | 40 |
| Figure 14. Exemple d'alternatives pour un déplacement déclaré par un répondant .....  | 41 |
| Figure 15. Exemple de scénario de l'enquête sur le confort à bord .....   | 42 |
| Figure 16. Variations dans les processus de développement des cycles de conduite .....  | 50 |
| Figure 17. Profils de vitesse de micro-segments générés avec la méthode D250 (gauche), S0 (centre) et DM (droite).....  | 51 |
| Figure 18. Classification des micro-segments avec la méthode 7 (a), la méthode 1 (b) et la méthode 5 (c).....   | 53 |
| Figure 19. Performance moyenne et écart-type des cycles de conduit pour un nombre d'itération variable .....  | 55 |
| Figure 20. RD moyenne et coefficient de silhouette selon le nombre de clusters pour la première méthode .....   | 57 |
| Figure 21. Entropie de provenance des automobilistes empruntant les différents liens du réseau autoroutier .....  | 66 |
| Figure 22. Pseudo taux d'utilisation des segments routiers.....   | 67 |
| Figure 23. Distribution fréquentielle du taux d'occupation des véhicules.....   | 68 |
| Figure 24. Pourcentage de VUS sur les différents segments autoroutiers .....  | 69 |
| Figure 25. Impacts et bénéfices des kilomètres cumulatifs parcourus sur les segments localisés dans les différentes régions (conducteurs seulement) .....   | 70 |
| Figure 26. Distribution spatiale des différents types de segments routiers .....  | 71 |
| Figure 27 Exemple de fichier texte au format csv en entrée pour TraClus-DL.....   | 73 |
| Figure 28 Exemple d'importation des fichiers de résultats de TraClus-DL dans QGis .....   | 75 |
| Figure 29 Exemple d'affichage des corridors (lignes noires et grasses) et des segments (lignes étroites).....   | 76 |
| Figure 30 Temps d'exécution du programme TraClus-DL en fonction du nombre de lignes de désir .....  | 77 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 31 Temps d'exécution du programme TraClus-DL en fonction de la largeur d'influence (max_distance).....                | 78 |
| Figure 32 Temps d'exécution du programme TraClus-DL en fonction de l'angle maximal (angle_max).....                          | 78 |
| Figure 33 Temps d'exécution du programme TraClus-DL en fonction du nombre minimal d'observations (min_density).....          | 79 |
| Figure 34 Temps d'exécution du programme TraClus-DL en fonction de la longueur de segmentation (segmentation_length).....    | 80 |
| Figure 35 Schéma décisionnel pour le choix des paramètres du programme TraClus-DL.....                                       | 81 |
| Figure 36. Obtention des plages de temps sous congestion pour un trajet de ligne de bus au moyen des données de Google ..... | 83 |
| Figure 37. Temps planifiés par rapport aux temps en voiture (même parcours sans tenir compte des temps d'arrêt) .....        | 83 |
| Figure 38. Temps planifiés par rapport aux temps en voiture (même parcours avec 8 secondes ajoutées par arrêt).....          | 84 |
| Figure 39. Temps planifiés par rapport aux temps en voiture (même parcours avec 20 secondes ajoutées par arrêt).....         | 84 |
| Figure 40. Temps d'arrêt équivalent pour un temps de parcours avec congestion moyenne (50%) .....                            | 85 |

# Liste des tableaux

|  |    |
|--|----|
| Tableau 1. Classification des modèles désagrégés de possession automobile depuis Anowar, Eluru, et al. (2014) .....  | 18 |
| Tableau 2. Résumé des approches de modélisation, des types de modèles et des exemples d'application. ....  | 19 |
| Tableau 3. Synthèses des variables d'influence de la motorisation des ménages.....   | 21 |
| Tableau 4. Ensembles de données qui seront utilisés dans la première contribution .....  | 24 |
| Tableau 5. Comparaison de l'enquête Origine-Destination et des données passives .....  | 30 |
| Tableau 6. Analyse de saisonnalité avec la transformée de Fourier - Fréquences et périodes détectées pour le métro à partir de deux sources de données ..... | 35 |
| Tableau 7. Ratios moyens entre les trois courbes enveloppes et coefficients de variation, par type de jour .....   | 36 |
| Tableau 8. Temps de parcours minimal, moyen et maximal en fonction du mode.....  | 43 |
| Tableau 9. Liste des scénarios à tester pour chaque mode de transport pour le confort à bord. ....   | 44 |
| Tableau 10. Liste des scénarios utilisés pour chaque bloc de questions .....   | 44 |
| Tableau 11. Méthodes de création des cycles de conduite .....  | 49 |
| Tableau 12. Paramètres caractéristiques des micro-segments .....   | 52 |
| Tableau 13. Critères d'évaluation de performance pour les cycles de conduite .....   | 54 |
| Tableau 14. Performance des 15 méthodes .....  | 58 |
| Tableau 15. Propriétés des groupes .....   | 70 |

# 1 Introduction

## 1.1 Mission générale de la Chaire Mobilité

La Chaire Mobilité a officiellement amorcé son second mandat à la fin de l'année 2016. Cette Chaire a été créée en 2010, dans le contexte où plusieurs autorités de transport se questionnaient sur l'évaluation du niveau de durabilité de leur plan, politique et projet de transport. Le premier mandat de cette Chaire s'est déroulé sur une période de 5 ans, de 2010-2015, et a permis de mettre sur pied un programme de recherche orienté autour de l'évaluation et de la mise en œuvre de la durabilité en transport, principalement par le biais de recherches de maîtrise et doctorat. En effet, la Chaire assure une mission claire de formation de personnel hautement qualifié.

Les objectifs de la Chaire ont d'ailleurs été articulés dès le début de ses activités selon six grands axes :

- **Veille.** Tous les projets de recherche impliquent le suivi de l'état des connaissances et ce, afin de bien identifier les limites des approches disponibles et les opportunités de contributions.
- **Recherche.** La Chaire assure principalement des activités de recherche qui visent à développer de nouvelles connaissances et contribuer à une compréhension plus nette et objectives des enjeux associés à la planification des transports et réseaux, à la modélisation de la mobilité et à l'évaluation du niveau de durabilité. Tout ceci, dans une perspective de contribuer à la prise de décision.
- **Développement.** Plusieurs des contributions sont de nature méthodologique ce qui suggère des potentialités de développement importantes. Les recherches visent à démontrer certaines fonctionnalités et éventuellement à proposer des développements d'outils opérationnels, dans le cadre d'autres ententes. Les travaux de la Chaire assurent les développements conceptuels et méthodologiques qui permettent de soutenir la modélisation des comportements et l'évaluation de différents scénarios.
- **Évaluation du niveau de durabilité.** La notion de niveau de durabilité est sous-jacente à l'ensemble des recherches entreprises à la Chaire. La formalisation d'un cadre conceptuel du niveau de durabilité s'inscrit aujourd'hui en filigrane des différentes recherches.
- **Formation.** La Chaire donne une grande place aux étudiants et leur assure un rôle de premier plan dans l'articulation des recherches. En outre, ces recherches se retrouvent rapidement au sein de la formation des futurs ingénieurs civils et alimentent l'articulation des prochaines recherches.
- **Transfert.** Assurer le transfert des connaissances et méthodes est un défi de premier plan et la Chaire assure une présence importante dans plusieurs activités de diffusion, en plus d'inviter la communauté à entendre ses résultats lors du colloque annuel. La mise en ligne des maîtrises, doctorats et d'un rapport annuel témoigne de la préoccupation de diffuser les travaux.
- **Pôle multidisciplinaire.** Le génie des transports de Polytechnique se porte très bien : les professeurs attirent un nombre important et constant d'étudiants provenant de différents horizons. D'ailleurs, c'est bientôt cinq professeurs qui seront actifs en génie civil – transports, ce qui multipliera les opportunités de recherche et développement. Tous seront évidemment invités à collaborer aux activités de la Chaire Mobilité.

## 1.2 Structure organisationnelle

### 1.2.1 Partenaires

La Chaire Mobilité a été initiée en 2010, par quatre partenaires institutionnels : la Ville de Montréal, la Société de transport de Montréal, le Ministère des transports ainsi que l'Agence métropolitaine de transport.

Avec les changements dans la gouvernance métropolitaine des transports, le 2<sup>e</sup> mandat de la Chaire Mobilité est soutenu par cinq partenaires : la Ville de Montréal, la Société de transport de Montréal, le ministère des transports, l'Agence régionale de transport métropolitain et Exo (réseau de transport métropolitain).

### 1.2.2 Collaborateurs

La professeure Catherine Morency est titulaire de la Chaire Mobilité et assure la direction scientifique et administrative de ses activités. Elle profite de la collaboration de différents collègues notamment pour la codirection d'étudiant-e-s, à savoir :

- Pr Martin Trépanier, professeure titulaire au département de mathématiques et génie industriel
- Pr Nicolas Saunier, professeur titulaire au département des génies civil, géologique et des mines
- Pr Bruno Agard, professeure titulaire au département de mathématiques et génie industriel
- Pr Owen Waygood, professeur agrégé au département des génies civil, géologique et des mines
- Pre Geneviève Boisjoly, professeure adjointe au département des génies civil, géologique et des mines
- Pr Francesco Ciari, professeur adjoint au département des génies civil, géologique et des mines

La Chaire compte aussi sur la contribution de quatre professionnels de recherche :

- **Hubert Verreault**, M.Sc.A., associé de recherche. Titulaire d'un baccalauréat et d'une maîtrise en génie civil à Polytechnique Montréal, Hubert Verreault est associé de recherche pour la Chaire Mobilité à Polytechnique Montréal depuis 2010. En plus de son travail d'associé de recherche, il agit également en tant que chargé de cours à Polytechnique dans différents cours portant sur le transport au baccalauréat. Il est également membre de l'Ordre des Ingénieurs du Québec. En plus de son expérience en recherche à Polytechnique Montréal, il a aussi travaillé à la défunte Agence Métropolitaine de Transport (AMT) à la réalisation de l'enquête OD 2008 de la région de Montréal. Son mémoire de maîtrise portait sur l'utilisation cohérente des enquêtes Origines-Destination. Ses expertises diversifiées portent principalement sur l'analyse de données en transport, les enquêtes en transport, les statistiques, le traitement de données, les bases de données, la programmation et la modélisation des transports.
- **Pierre-Léo Bourbonnais**, Ph.D., associé de recherche. Après avoir terminé un baccalauréat en génie mécanique à Polytechnique Montréal, Pierre-Léo Bourbonnais a complété ses études en transport (Baccalauréat-maîtrise intégré avec maîtrise en génie civil/transport) avec passage accéléré au doctorat. Ses qualités de chercheur, entre autres, sa capacité de synthèse et sa facilité à réaliser des tâches dans différents domaines avec rigueur et ponctualité l'ont conduit à s'investir dans cette spécialisation. Le transport est un de ces domaines dont les phases de recherches ont fort à gagner de l'intégration accrue de la collecte, de l'analyse et de la diffusion des données grâce à des outils technologiques dont il maîtrise plusieurs

aspects. Au cours des années, Pierre-Léo Bourbonnais a acquis une forte réputation dans la gestion de données de mobilité et la production d'objets de visualisation innovateurs favorisant autant la diffusion auprès des partenaires et du public que la compréhension des enjeux par les analystes et intervenants du milieu.

- **Jean-Simon Bourdeau**, M.Sc.A., associé de recherche. Titulaire d'un baccalauréat et une maîtrise en génie civil de Polytechnique Montréal, Jean-Simon travaille à titre d'associé de recherche pour la Chaire Mobilité de Polytechnique Montréal depuis plus de cinq ans. Ses travaux de maîtrise ont porté sur l'analyse de l'offre et de l'utilisation des stationnements à Montréal. Il a aussi travaillé à titre d'associé de recherche sur plusieurs mandats de recherche et développement pour différents mandataires, notamment la ville de Montréal (politique de stationnement), le MTQ, les villes de Longueuil et Québec, Vélo Québec et la Communauté Métropolitaine de Montréal. Jean-Simon se spécialise dans les calculateurs de trajets, le traitement de flux de données en transport, les enquêtes Origine-Destination et l'analyse spatiale. En plus de ses activités de recherche, Jean-Simon a aussi été chargé de cours et de laboratoires à Polytechnique Montréal dans plusieurs cours de transport : Systèmes de Transport (CIV2710), Technologies informationnelles en génie civil (CIV1120), Gestion de données en transport (CIV8760), Circulation (CIV4740).
- **Brigitte Milord**, M.Sc.Econ., associée de recherche. Titulaire d'une maîtrise en sciences économiques de l'Université de Montréal, Brigitte Milord possède 10 années d'expérience dans les milieux de la consultation et de la recherche académique. Avant de rejoindre la Chaire Mobilité, à titre d'associée de recherche, elle a travaillé pour le Centre de recherche en analyse des organisations (CIRANO), pour les firmes de consultants AECOM et Deloitte ainsi que pour l'organisme à but non lucratif Vivre en Ville. Elle se spécialise dans l'évaluation de politiques publiques dans les secteurs des transports, de l'environnement, de la santé et de la fiscalité municipale.

### 1.2.3 Comité scientifique

Dès son lancement, la Chaire a créé un comité scientifique constitué d'experts internationaux sur différents thèmes d'intérêt de la Chaire, d'une part pour assurer son rayonnement international et l'émergence de collaborations de recherche et d'autre part pour assurer qu'un regard critique et indépendant soit porté sur ses activités. Le comité scientifique est actuellement composé de :

- Pr Matthew Roorda: Département de génie civil de l'Université de Toronto (modélisation du transport des marchandises et passagers)
- Pr Antonio Paez: École de géographie et des sciences de la terre de l'Université McMaster (analyse spatiale et statistique, comportements de mobilité)
- Pr Zachary Patterson (depuis juin 2013): Département de géographie, planification et environnement, Faculté des arts et des sciences, Université Concordia (Montréal, Canada); le professeur Patterson succède au professeur Paul Lewis de l'Institut d'urbanisme de l'Université de Montréal.
- Dr Patrick Bonnel: Laboratoire d'Économie des transports de Lyon (Analyse des comportements de mobilité urbaine, modélisation de la demande de transport)
- Pr Kostas Goulias: Laboratoire Geotrans de l'Université de Californie à Santa Barbara (Modélisation de la demande de transport, modèles d'activités, simulations par agents)

### 1.3 Programme de recherche

Le programme de la Chaire s'articule autour de cinq grands axes de recherche, tel qu'illustré sur la Figure 1 : 1) la modélisation des comportements individuels de mobilité, 2) la modélisation des

facteurs ayant une incidence sur les comportements de mobilité, 3) la modélisation des impacts des comportements de mobilité, 4) l'expérimentation et le développement de méthodes de collecte, traitement et analyse de données et 5) la formulation et l'estimation de scénarios.

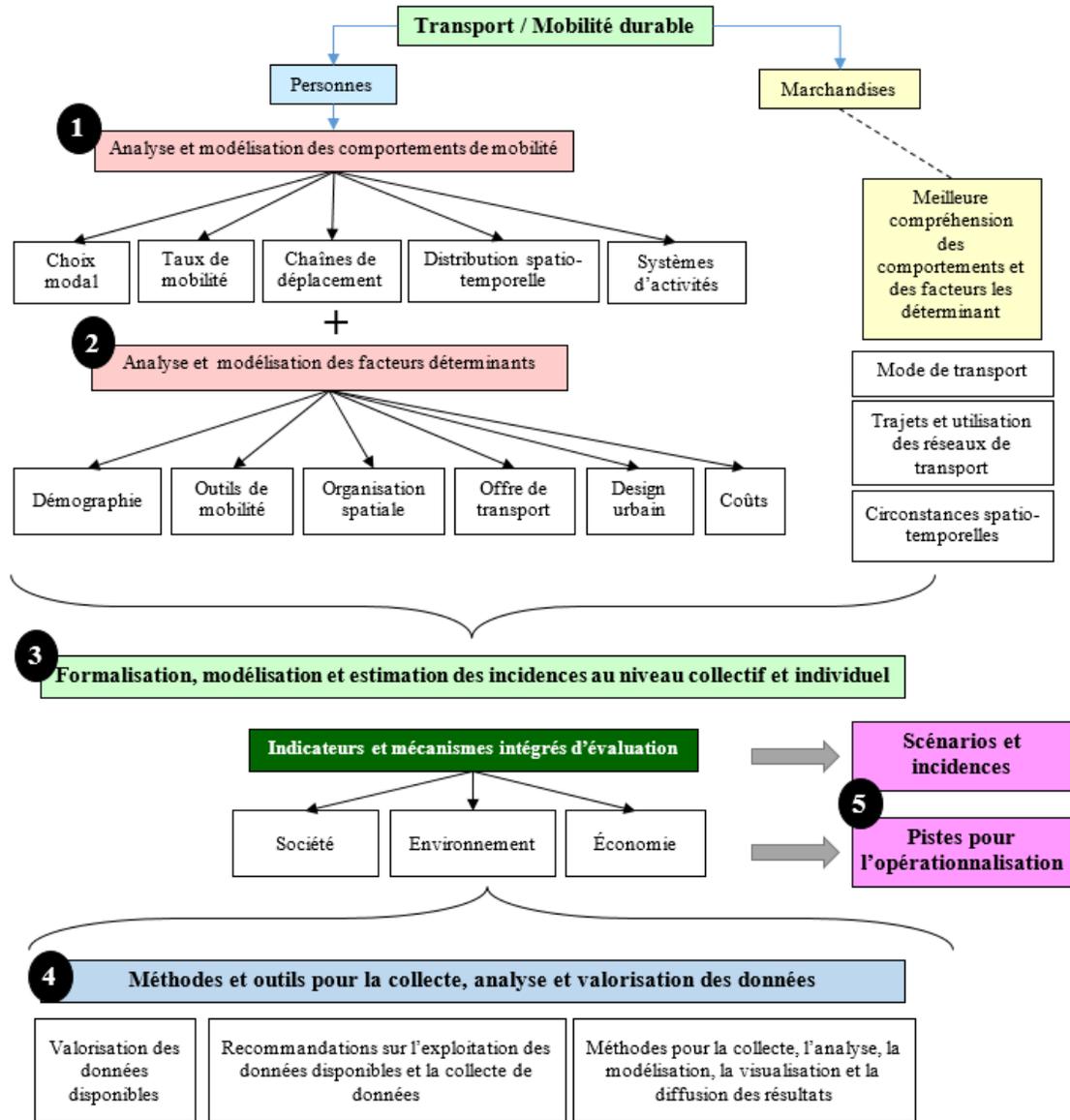


Figure 1. Représentation schématique du programme de recherche de la Chaire Mobilité

#### 1.4 Contenu du rapport

Ce document fait état des activités de recherche conduites du 1<sup>er</sup> janvier au 31 décembre 2019. Les différentes activités de recherche conduites par les étudiants et professionnels de la Chaire sont décrites dans la prochaine section. Différentes activités de rayonnement sont aussi présentées.

Les textes relatifs aux travaux de recherche des étudiantes sont des extraits préliminaires de leurs futurs mémoires et thèses.

## 2 Activités de recherche

### 2.1 Maîtrises complétées en 2019

Lepage, S. (2019). Modélisation des interactions entre les modes de transport aux abords des stations de métro. (Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal).

Mageau-Béland, J. (2019). Développement d'indicateurs de durabilité pour le transport en commun. (Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal).

Michaud, C. (2019). Méthode de diagnostic du niveau d'équité d'un réseau de transport collectif. (Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal).

Jeudy, Y. (2019). Outil d'aide au diagnostic et à la conception des réseaux de transport en commun. (Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal).

## 2.2 Méthodologie d'évaluation du partage spatiotemporel de la rue

- Par : Gabriel Lefebvre-Ropars, doctorat
- Supervision : Pre Catherine Morency / Pre Paula Negron-Poblete (Université de Montréal)
- Contexte : Chaire Mobilité

### 2.2.1 Introduction

De plus en plus de documents de planification, au Québec et ailleurs, contiennent des objectifs relatifs à l'amélioration du partage de l'espace urbain entre les usagers de divers modes de transport (piétons, cyclistes, usagers du transport collectif, automobilistes, etc.). On peut citer par exemple la Stratégie centre-ville de Montréal (Ville de Montréal, 2008) ou encore la Stratégie de mobilité urbaine de Stockholm (City of Stockholm, 2012). Toutefois, peu d'indicateurs de suivi et de mesure des résultats sont proposés pour assurer la mise en œuvre de ces objectifs. Le partage de l'espace – et du temps – urbain reste en effet un concept difficile à saisir, définir et mesurer.

L'espace public urbain (les rues et les intersections) est divisé en plusieurs sous-espaces alloués à diverses clientèles. Par exemple, une rue donnée peut compter des trottoirs pour accueillir les piétons, des voies réservées aux autobus et des voies de circulation générale pour accueillir l'ensemble des autres modes de transport. Le partage de l'espace urbain lié à la dimension temporelle : il varie selon l'heure de la journée (avec des voies réservées en période de pointe seulement, par exemple), en plus d'être également influencé par les débits maximaux imposés par les feux de circulation aux intersections. Ce partage de l'espace-temps urbain est le produit d'un arbitrage politique, administratif et technique entre les divers modes, arbitrage sous-tendu par des principes implicites ou explicites d'équité et d'accessibilité (Patton, 2007; Martens, 2017).

Hui et al. (2018) soulignent qu'il n'existe nulle part de mesures à grande échelle pour étudier le caractère équitable de ce partage et ses effets sur l'accessibilité, alors même que les pouvoirs publics investissent des sommes colossales dans le réaménagement des infrastructures urbaines dans le but d'en améliorer le partage. Quelques méthodes ont été proposées, mais toutes ces méthodes dépendent d'une analyse réalisée sur le terrain (Hampton, 2013) ou encore d'une classification manuelle des voies de circulation à l'aide de photos satellites (Colville-Andersen, 2013; Gössling et al. 2016). Il n'existe ainsi, à l'heure actuelle, aucune manière automatisée pour effectuer le diagnostic du partage de l'espace et du temps urbain à l'échelle d'une ville en intégrant la demande existante et potentielle.

### 2.2.1 Objectifs

Le projet de recherche vise à répondre à la question suivante : l'espace-temps urbain (dans la région de Montréal, en l'occurrence) est-il réparti de manière équitable entre tous les usagers? L'objectif général du projet est ainsi de développer des outils d'évaluation de l'équité dans l'allocation de l'espace-temps urbain alloué à chaque mode de transport en milieu urbain. Les objectifs spécifiques de recherche sont les suivants :

1. Élaborer un cadre conceptuel du partage équitable de l'espace-temps urbain;
2. Développer des indicateurs d'équité du partage de l'espace-temps urbain;
3. Développer un outil automatisé de mesure de l'allocation de l'espace-temps urbain en milieu urbain à partir de bases de données existantes;
4. Poser un diagnostic de l'équité du partage de l'espace-temps urbain sur le territoire et de son effet sur l'accessibilité des personnes et des lieux en croisant les données d'offre et de demande en transport.

### 2.2.2 Revue de la littérature

Le survol de la littérature scientifique et technique portant sur le partage de la rue effectué dans ce chapitre permet de tirer quelques constats qui orienteront les suites du présent projet de recherche. Tout d'abord, la rue doit être envisagée comme un objet multidimensionnel et non pas simplement comme un corridor de circulation. La dimension de lien est certes importante, mais le rôle de la rue comme lieu est tout aussi fondamental. L'équilibre entre ces dimensions, ainsi qu'entre les différents usagers au sein de ces dimensions – tout particulièrement entre les différents modes de transport –, doit être considéré non seulement comme problème d'allocation d'une emprise physique, mais également d'une offre temporelle régulée à diverses échelles. Si des auteurs (Jones et al., 2008, 2009; Rodriguez-Valencia, 2014) ont proposé des esquisses de cadres théoriques relatifs au partage de la rue, il n'existe pour l'instant aucun cadre permettant de quantifier les compromis effectués dans le cadre du partage d'une rue urbaine et d'effectuer une répartition des espaces-temps sur la base de principes formels de d'équité (Hui et al., 2018).

Une série de chercheurs et de praticiens ont abordé la question de la mesure du partage de la rue dans ses aspects spatiaux et temporels ainsi que sous l'angle de la consommation d'espace-temps et de la capacité. Les mesures recensées se limitent pour la plupart au seul traitement soit de l'espace, soit du temps, lorsqu'elles tentent d'établir si la rue offre un accès équitable à tous ses usagers. La seule approche tenant compte à la fois de l'espace et du temps, c'est-à-dire celle du  $m^2 \cdot h$ , n'est appliquée dans la littérature qu'à la mesure de la demande observée ou potentielle, mais jamais pour caractériser l'offre.

Les méthodes de quantification actuelle du partage de la rue sont limitées sur le plan analytique. Tout d'abord, ces méthodes tiennent seulement compte de la dimension de lien de la rue, ignorant son rôle en tant que lieu, et donc les usages de l'espace-temps non associés au transport. De plus, les auteurs qui effectuent un diagnostic du partage de la rue ne réfèrent presque jamais à un principe explicite de répartition équitable des espaces(-temps) de la rue, rendant ainsi difficile la création d'indicateurs et d'outils de design des rues urbaines applicables à grande échelle. De plus, l'ensemble des modes de déplacement possibles sont rarement considérés dans les méthodes existantes, celles-ci se limitant souvent au traitement de deux ou trois modes, à l'exception des travaux de Gössling et al. (2016).

Du point de vue méthodologique, les approches existantes sont pour la plupart basées sur des méthodes manuelles de collecte de données, ce qui limite leur potentiel de généralisation à une échelle municipale ou métropolitaine sans devoir faire appel à des méthodes d'expansion basées sur des hypothèses. Les quelques méthodes basées sur une méthodologie automatisée présentent un bon potentiel de généralisation, mais sont limitées par les données disponibles sur les modes qui ne sont pas traditionnellement modélisés dans les outils de planification des transports – les modes actifs en particulier – et doivent souvent recourir à des hypothèses afin de les traiter, quand ils ne sont pas complètement omis des analyses.

Il y a donc là l'opportunité de développer une méthodologie automatisée permettant de mesurer la distribution de l'espace-temps dans un réseau de rues urbaines et de poser un diagnostic sur le partage de cet espace-temps à partir de principes formels d'équité. Le prochain chapitre expose la méthodologie proposée afin de mener à bien ce projet.

### 2.2.3 Méthodologie

Le présent projet de recherche vise à développer un cadre d'analyse ainsi que des outils de mesure et de modélisation de l'adéquation entre l'offre et la demande en espace-temps dans les

rues urbaines, puis à proposer des scénarios alternatifs de partage de la rue selon divers profils de demande. Pour ce faire, une approche automatisée basée sur les grands ensembles de données géoréférencées est privilégiée afin de permettre le développement d'une méthode transférable à d'autres contextes urbains.

Le projet a pour objectif de combler les lacunes identifiées dans les méthodes existantes de mesure du partage de la rue et de proposer une méthode tenant compte des deux principales dimensions de la rue – le lieu et le lien – ainsi que de la dimension temporelle, le tout en se basant sur les principes de distribution des ressources issus de la littérature sur l'équité.

Le projet proposé se divise en trois grandes étapes, chacune amenant une contribution originale à la recherche sur le partage de la rue. Dans un premier temps, une méthode automatisée est développée afin de mesurer l'offre en espace-temps associée aux deux dimensions principales de la rue – le lieu et le lien – et, dans le cas du lien, aux différents modes de transport urbain. La distribution de cette offre est analysée à différentes échelles spatiales et temporelles ainsi qu'en relation avec la structure urbaine et les dynamiques sociodémographiques du milieu. Dans un deuxième temps, la demande actuelle en espace-temps, ainsi que différents profils de demande potentielle, sont estimées afin d'établir si l'offre précédemment mesurée est distribuée de manière équilibrée en fonction des usagers actuels et potentiels de la rue et ce, en fonction de différents principes d'équité. Dans un troisième et dernier temps, une série de scénarios alternatifs de partage de la rue est élaborée à partir des conclusions tirées sur la distribution de l'offre ainsi que de différents profils de demande.

#### 2.2.4 Prototype d'un outil de mesure de l'espace-temps<sup>1</sup>

Les habitudes et comportements de mobilité se forment durant la jeunesse. Les enfants qui se rendent à l'école à l'aide de modes de transport actifs sont plus susceptibles de continuer à les pratiquer une fois rendus adultes (Mjahed, Frei et Mahmassani, 2015). Dans la grande région de Montréal, on remarque toutefois que de plus en plus d'enfants sont reconduits à l'école en voiture par leurs parents (Lewis et Torres, 2010). Cette tendance laisse craindre que ces enfants développent des habitudes basées sur l'automobile individuelle une fois adultes, nuisant aux objectifs d'augmentation de la part modale des modes actifs et collectifs inscrits dans les politiques publiques.

Un grand nombre de facteurs influence le choix modal des enfants dans leurs déplacements vers l'école et ces facteurs diffèrent de ceux qui affectent le choix modal des adultes : une rue dont le partage ne favorise pas les cheminements sécuritaires à pied, par exemple, peut décourager les parents d'envoyer leurs enfants à l'école à pied (Ito et al., 2017; Lefebvre-Ropars et Morency, 2018; Mitra, Buliung et Roorda, 2010; Wong, Faulkner et Buliung, 2011). Il peut donc être intéressant d'appliquer les méthodes de mesure du partage de la rue au cas des itinéraires vers l'école. Dans ce prototype d'application, des itinéraires vers l'école sont caractérisés en employant les méthodes de mesure du partage spatiotemporel de la rue développées dans le cadre du présent projet.

Des algorithmes de mesure de la superficie allouée à chaque type d'utilisateur de la rue sont tout d'abord créés. Une typologie de rues sur le territoire de la ville de Laval est ensuite développée à partir des mesures prises. Finalement, à l'aide d'une base de données d'inscriptions scolaires, les

---

<sup>1</sup> Ce texte est une traduction du résumé long d'un article présenté au 98<sup>e</sup> Congrès annuel du Transportation Research Board (Lefebvre-Ropars, Morency et Negron-Poblete, 2019).

itinéraires les plus courts entre le domicile et l'école des étudiants lavallois sont calculés et caractérisés en fonction du partage des rues qu'ils empruntent.

#### 2.2.4.1 Méthodologie

Le territoire d'étude choisi pour ce prototype est la ville de Laval, qui rend disponible sur le portail Données Québec (Données Québec, s.d.) un inventaire des surfaces de ses rues, sentiers piétons et pistes cyclables. Ce jeu de données est constitué de polygones représentant différentes sections de la rue selon leur type : chaussée, trottoir, piste cyclable protégée, sentier multifonctionnel, terre-plein, chemin privé ou intersection. Des caractéristiques additionnelles (vitesse permise, nombre de voies...) sont obtenues en croisant ces données avec la base de données Adresses Québec.

Les données d'inscriptions scolaires géoréférencées à l'aide du code postal sont obtenues auprès du ministère de l'Éducation et de l'Enseignement supérieure pour l'année scolaire 2013-2014. Ces données sont utilisées pour calculer des paires origine-destination entre le domicile et l'école selon le chemin le plus court à l'aide du calculateur en licence libre OSRM. Seuls les itinéraires dont l'origine (le domicile) et la destination (l'école) sont situées sur le territoire de Laval sont conservés dans la base de données.

Les autres jeux de données utilisés incluent le réseau cyclable et piéton (Ville de Laval, 2018), les voies réservées aux autobus (Ministère des Transports, 2016), l'utilisation du sol (CMM, 2016), le Recensement de la population (Statistique Canada, 2016), la localisation des arrêts d'autobus (Société de transport de Laval, 2018) ainsi que l'Enquête Origine-Destination, version 13.2b (Secrétariat à l'Enquête Origine-Destination, 2013).

#### Préparation des données

Les surfaces de rues identifiées comme chaussées, trottoirs, terre-pleins et voies cyclables protégées sont regroupées en segments de rues selon leur proximité spatiale à l'aide de PostGIS. Les caractéristiques des segments (classification fonctionnelle, limite de vitesse et nombre de voies) sont obtenues à l'aide d'une jointure spatiale depuis la base de données Adresses Québec. Les arrêts de bus, voies réservées et voies cyclables non protégées sont associées aux rues à l'aide d'une jointure spatiale. La présence d'une voie de stationnement est déduite à partir des données sur le nombre de voies et de la largeur de l'emprise. L'utilisation du sol dominante pour les terrains adjacents au segment de rue et la période dominante de construction des immeubles dans un rayon de 400 mètres sont ensuite calculées pour chaque segment.

#### Allocation de l'espace à différents usagers

Un vecteur de 8 usagers ou combinaisons d'usagers de la rue est créé pour chaque polygone de la base de données de surfaces de rues. À travers une série de règles d'association, une valeur est assignée à chaque champ en fonction de la portion de la surface du polygone qui est allouée à chaque usager ou combinaison d'usagers. L'espace total alloué à chaque usager et combinaison d'usagers est ensuite calculé pour chaque segment de rue. À l'aide d'un algorithme de partitionnement selon les K-moyennes, une typologie de segments de rue est créée à partir des vecteurs précédemment construits.

#### Construction d'une base de données d'itinéraires calculés domicile-école

À l'aide du calculateur OSRM, le chemin le plus court entre le domicile et l'école de chaque élève de la base de données est calculé. Seules les paires OD dont la longueur est inférieure à 1,6 km, c'est-à-dire la distance considérée comme marchable par la Commission scolaire de Laval (Commission scolaire de Laval, s.d.), sont conservées. Des vecteurs uniques rue\*étudiant\*école sont ainsi créés.

#### 2.2.4.2 Résultats

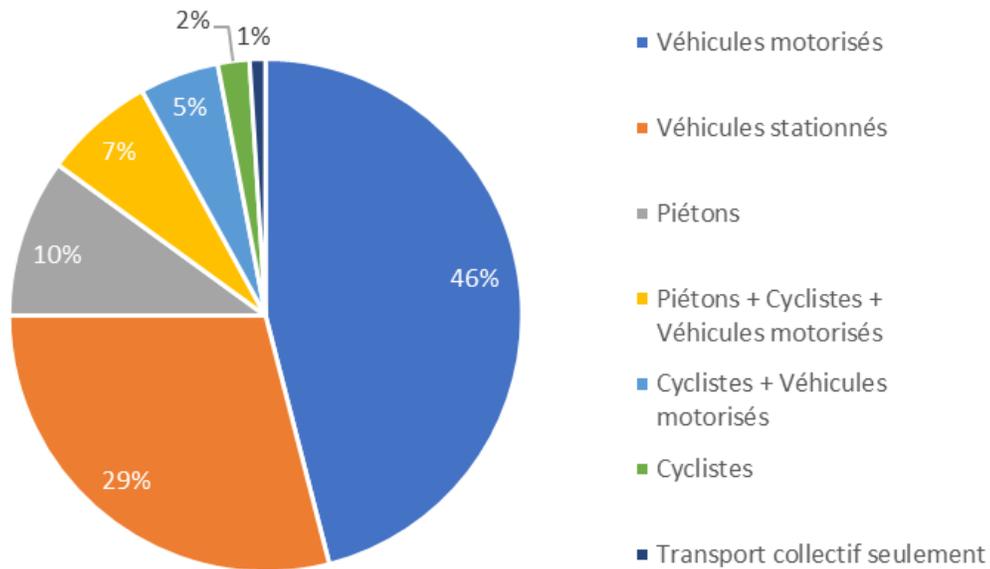


Figure 2. Partage de la surface de rue selon les usagers ou groupes d'usagers

#### Partage de la surface de rue

Tel que présenté à la Figure 2, environ 75 % de l'espace dans les rues de Laval est alloué à l'usage exclusif des véhicules motorisés, qu'ils soient stationnés ou en circulation, tandis que 13 % de l'espace est alloué exclusivement aux usagers des modes actifs ou du transport collectif. Cette distribution semble liée à la densité résidentielle, puisqu'une proportion plus petite de l'espace de la rue est allouée aux véhicules motorisés dans les quartiers denses de Laval. Les secteurs agricoles et industriels, en contrepartie, sont caractérisés par des rues qui offrent une plus grande part aux véhicules motorisés. La période dominante de construction résidentielle ne semble pas liée aux paramètres de partage de la rue. Les rues avec une limite de vitesse plus élevée voient une part plus petite de leur superficie allouée aux modes actifs, surtout si elles sont classées comme axes régionaux ou nationaux par le ministère des Transports.

Quatre types distincts de rues sont identifiés à l'aide de la démarche de partitionnement (voir Figure 3) : les artères multimodales [0], les rues sans trottoir, avec stationnement [1], les rues résidentielles avec trottoir [2] et les rues sans trottoir, sans stationnement [3].

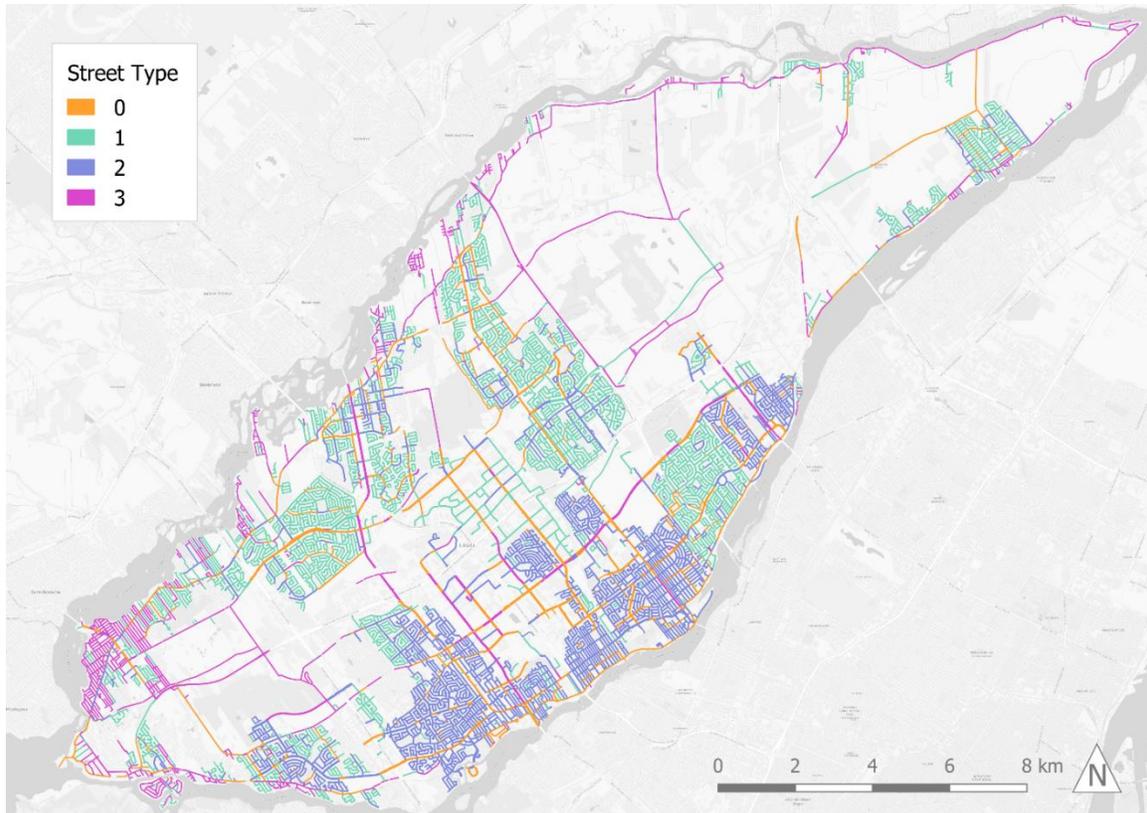


Figure 3. Distribution spatiale des types de rues

#### Partage de la rue sur le chemin de l'école

Le partage de la rue au long des itinéraires calculés domicile-école à Laval est variable. Si 20 % de l'espace de certains vecteurs rue\*étudiant\*école liés à certaines écoles est alloué exclusivement aux piétons, d'autres écoles sont caractérisées par un manque total d'espace dédié aux piétons dans leur bassin de 1,6 km. Dans le cas de 21 % des écoles, les itinéraires calculés qui utilisent des rues sans trottoir sont concentrés sur des rues orientées vers l'automobile, même en présence d'autres types de rues.

Les itinéraires calculés empruntent deux ou plus de deux types de rues dans 82 % des cas. La combinaison la plus fréquente de types de rues réunit les rues résidentielles avec trottoirs et les rues sans trottoir, sans stationnement. Cela signifie qu'un grand nombre d'élèves doit utiliser des segments de rues où ils partagent l'espace avec des véhicules motorisés pour au moins une partie de leur trajet, même dans les quartiers les plus denses. Puisque les itinéraires calculés sont ceux qui sont utilisés pour déterminer les paramètres de la desserte en bus scolaire, cela sous-entend que des enfants pourraient devoir rallonger leurs trajets afin d'emprunter des rues plus sécuritaires, mais toujours être considérés comme non éligibles au transport scolaire.

#### 2.2.5 Conclusion

Le partage de la rue pour différents usagers et combinaisons d'usagers est calculé pour le territoire de Laval en utilisant une base de données de surfaces de rues ainsi que des données sur le réseau routier, l'environnement urbain et la composition des quartiers. La part dominante de l'espace urbain allouée aux véhicules motorisés, que ce soit pour leur circulation ou leur entreposage, est ainsi soulignée.

En utilisant la part relative de la superficie de la rue allouée à chaque usager ou combinaison d'usager, une typologie de rues est développée. Cette typologie est ensuite utilisée pour caractériser les itinéraires calculés vers les écoles dans un rayon de 1,6 km à l'aide de la base de données des inscriptions scolaires pour l'année 2013-2014. Les itinéraires à destination d'écoles situées dans des milieux denses comptent plus d'espace alloué aux piétons, tandis que l'espace est partagé avec les véhicules motorisés dans les milieux moins denses. La méthode permet également d'établir que dans le cas de 20 % des écoles, les itinéraires calculés sont concentrés sur des rues comptant peu d'infrastructures exclusives aux piétons, même si le partage des rues dans le voisinage de ces écoles est plus favorable aux piétons.

Les méthodes développées ont leurs limites. Tout d'abord, la typologie de rues créée ne tient pas compte de la nature des intersections, du nombre de voies ou du volume de circulation, ce qui pourrait introduire un biais favorable aux grandes artères comptant des trottoirs. De plus, la quantification du partage de la rue omettra toujours une part de l'expérience urbaine : pollution sonore, rage au volant, qualité de l'environnement urbain, etc.

## 2.3 Dépendance à l'automobile

- Par : Jérôme Laviolette, doctorat
- Supervision : Pre Catherine Morency / Pr Owen Waygood
- Contexte : Chaire Mobilité

### 2.3.1 Introduction

Les conséquences environnementales, sociétales et économiques de l'*automobilité* – le paradigme de mobilité centré sur l'automobile personnelle – sont largement documentées (e.g. Gärling & Steg, 2007; Héran, 2011) et ce paradigme est appelé à devoir changer rapidement face à l'urgence climatique et au besoin de réduire drastiquement et rapidement les émissions de gaz à effet de serre (GES). Le concept d'*automobilité* est intimement relié à celui de dépendance à l'automobile. Cette notion est toutefois complexe et la littérature sur la question ne semble pas s'entendre sur une définition commune. La dépendance à l'automobile comprend plusieurs aspects interreliés entre eux qui nécessitent d'être explorées davantage afin d'identifier les approches à utiliser pour soutenir un changement de paradigme. On peut par exemple poser la question de la dépendance sociétale à l'automobile, qui peut inclure la persistance du paradigme d'*automobilité* dans la planification du développement urbain, du développement des réseaux de transport et plus largement des politiques de mobilité urbaine. La dépendance sociétale peut aussi être analysée depuis la perspective des normes sociales et culturelles associées à l'utilisation et la possession automobile. Au niveau individuel, on peut tenter d'évaluer dans quelle mesure les gens ont une dépendance psychologique à l'automobile, en son émotionnellement attachés (Jensen, 1999). Mais aussi, dans quelles mesures ceux-ci sont-ils captifs de leur véhicule en raison d'éléments structureaux (offre de transport collectif et actif inadéquate et environnement bâti favorisant l'automobile au détriment des alternatives) difficiles à changer. Ces éléments structureaux peuvent se rattacher au niveau de dépendance à l'automobile d'une ville, une perspective explorée largement par Newman et Kenworthy (1989, 1999, 2015) dans leurs ouvrages sur la question.

Au niveau individuel, la dépendance à l'automobile repose en grande partie sur le besoin (réel ou perçu) pour les ménages de posséder un ou plusieurs véhicules pour subvenir à leur besoin de mobilité et atteindre leurs lieux d'activités réguliers. Identifier et analyser les facteurs d'influence de la motorisation des ménages est donc un élément fondamental pour comprendre les enjeux associés à la dépendance à l'automobile. De plus, la transition vers un paradigme de mobilité durable attendu d'une lutte efficace contre les changements climatiques se doit de passer par une réduction, ou du moins une stabilisation des taux de motorisation. En effet, au Québec, le nombre de voitures personnelles (véhicules de promenade) a augmenté de 38 % entre 2000 et 2017, alors que la population a augmenté de seulement 13 % (SAAQ, 2018b). Cette situation est critique puisque la littérature démontre que la possession automobile a des impacts considérables sur les comportements de mobilité des ménages (profil d'activité, choix du mode de transport, distance parcourue en automobile) en plus d'être intrinsèquement liée aux décisions de localisation résidentielle. En ce sens, il n'est pas surprenant que la possession automobile, plus précisément sa modélisation sous diverses formes, soit régulièrement étudiée dans la littérature en transport.

Comprendre les déterminants de la possession automobile (caractéristiques des ménages, préférences individuelles et attitudes, caractéristiques du milieu bâti, offre de transport, variables économiques, etc.), notamment ceux associés à une augmentation des taux de motorisation des ménages, mais aussi ceux qui permettent de les réduire est essentiel dans un processus de planification de l'aménagement du territoire et des réseaux de transport visant à réduire la dépendance à l'automobile.

### 2.3.2 Objectifs et contributions attendues

Ce projet doctoral a pour objectif général de mieux comprendre les facteurs d'influence de la motorisation des ménages dans une perspective de réduction de la dépendance à l'automobile.

**La première contribution** proposée vise à caractériser les facteurs d'influence de la motorisation des ménages et de son évolution. Pour y arriver, plusieurs approches de modélisation seront explorées afin d'identifier lesquelles permettent de mieux capturer l'ensemble de la complexité des interactions entre ces différents facteurs dans la grande région de Montréal. Parmi les facteurs qui demeurent mal compris, l'influence de la diversification et la prolifération des services de mobilité disponibles en milieu urbain en sus du transport collectif (autopartage traditionnel et en libre-service, vélopartage, transport à la demande, autres modes de transport partagés) recevra une attention particulière.

**La deuxième contribution** vise à mieux définir le concept de dépendance à l'automobile et à définir des indicateurs de mesures de cette dépendance. Il s'agira d'évaluer quelle part des ménages du grand Montréal est structurellement captive de l'automobile en fonction de la structure du ménage, de l'offre de mobilité disponible et des lieux d'activité réguliers à visiter. Une approche par scénarios de transferts modaux systémiques sans véhicules privés sera élaborée. La méthode visera aussi l'identification des caractéristiques des ménages et des secteurs offrant le plus grand potentiel de réduction de la dépendance à l'automobile et la réduction du besoin de possession automobile.

**La troisième contribution** a pour objectif d'explorer les stratégies et politiques publiques de réduction des besoins (perçus et/ou réels) de motorisation. Il s'agira dans un premier temps de recenser ces stratégies déjà mises en œuvre et dont les impacts ont été évalués empiriquement. Ensuite, il s'agira d'évaluer si les stratégies individualisées de changements volontaires de comportement de mobilité (connues dans la littérature anglophone sous des appellations telles que « Individualized travel marketing » ou « Voluntary travel behavior change measures » (Bamberg & Rees, 2017)) peuvent être appliquées spécifiquement à l'objectif d'encourager et d'accompagner la démotorisation (partielle ou totale) des ménages.

Pour le présent rapport, seule la première contribution est rapportée. Les deux autres n'ayant pas encore été entamées.

### 2.3.3 Revue de littérature

#### 2.3.3.1 Concept de dépendance à l'automobile

La première mention du concept de dépendance à l'automobile dans la littérature scientifique provient des chercheurs australiens Newman et Kenworthy (1989) qui, dans leur livre *Cities and Automobile Dependence : An International Sourcebook*, comparent les systèmes de transport, les dépenses énergétiques de ces systèmes, l'aménagement urbain et les particularités économiques

de 32 villes en Amérique du Nord, en Australie, en Europe et en Asie. Leur objectif était de mieux comprendre comment ces différentes caractéristiques définissent les variations importantes de dépendance à l'automobile entre les villes étudiées. Pour ces chercheurs, le degré de dépendance automobile d'une ville est basé sur les taux de motorisation, le niveau d'utilisation de la voiture (en véhicules-kilomètres annuels par personne) et le degré d'utilisation des réseaux de transport collectif (Kenworthy & Laube, 1999). Dans leur deuxième livre publié dix ans plus tard, *Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence* (Newman & Kenworthy, 1999), ils dressent plusieurs constats marquants sur ce qui influence la dépendance à l'automobile. Trois de leurs constats résumés par Kenworthy et Laube (1999) sont à retenir :

1. La dépendance d'une ville à l'automobile ne serait que très peu liée à son niveau de richesse. En effet, les villes européennes et asiatiques, avec un niveau de richesse comparable aux grandes villes américaines, sont largement moins dépendantes de l'automobile. Avec cette conclusion, les auteurs réfutent donc l'idée que l'augmentation de la dépendance automobile soit une conséquence inévitable de l'accroissement de la richesse d'une région.
2. L'aménagement urbain, en prenant la densité comme indicateur, serait très fortement corrélée au niveau de la dépendance automobile.<sup>2</sup>
3. La dépendance à l'automobile d'une ville n'amènerait pas de gain au niveau de la performance économique de celle-ci. Un système de transport plus centré sur l'utilisation de l'automobile afficherait même un coût total de fonctionnement (en pourcentage des produits régionaux bruts) plus élevé. Ainsi, les villes européennes et asiatiques seraient plus efficaces au niveau des coûts, mais aussi de la durabilité de leur système de transport.

En somme, l'approche de Newman et Kenworthy explore les facteurs économiques et structurels qui sont corrélés aux variables qui caractérisent, à leurs yeux, la dépendance automobile (possession et utilisation de l'automobile) dans une trentaine de villes différentes sur quatre continents pour une période choisie (1990-1991). La relation qu'entretiennent les individus avec l'automobile et les aspects culturels et sociologiques de cette dépendance et de sa résilience ne sont pas explorés.

Reprochant le manque de clarté sur ce que signifie le concept de « dépendance à l'automobile », Dupuy (1999) publie en France le livre *La dépendance automobile : symptômes, analyses, diagnostic, traitement*. Comme le rapporte Gallez (2018), Dupuy se demande ainsi à qui s'applique cette dépendance : aux individus, à la société, aux espaces ?

Selon Dupuy (1999), la dépendance à l'automobile n'est pas qu'une question d'attachement individuel à la voiture ni de dépendance à son utilisation. La dépendance est aussi structurelle et sociétale et elle repose principalement sur « l'effet de club » de la voiture. Ainsi, plus il y a d'automobilistes, plus les avantages en matière d'infrastructures, de services dédiés et d'accès aux destinations augmentent, ajoutant ainsi une sorte de bonus collectif qui accroît les bénéfices individuels à l'utilisation de la voiture. Dans cette analogie, Dupuy (1999) fait ainsi mention du développement d'une norme sociale liée à l'utilisation de la voiture, indiquant que « c'est par le

---

<sup>2</sup> Pour plus de détails sur la relation entre la forme urbaine et les variables de transport, voir les synthèses de Ewing et Cervero (2001, 2010).

comportement des autres que nous sommes incités à utiliser l'automobile et que nous en sommes, par là même, dépendants » (Dupuy, 1999, p. 14).

Selon lui, la dépendance automobile va plus loin que le seul système de mobilité, elle englobe un système d'organisation de notre société allant des chaînes d'approvisionnement à l'organisation des activités des individus en fonction de leur accès à l'automobile. La croissance marquée de ce système, malgré les avantages pour les individus et pour les entreprises, génère des externalités négatives croissantes sur la santé, la société, l'environnement, l'économie et les finances publiques. Qui plus est, ce sont les individus exclus du système, soit ceux ne possédant pas de voiture, ou pire, pas de permis de conduire, qui en subissent le plus farouchement les conséquences.

L'automobilité s'est développée progressivement au cours des dernières décennies dans la majorité des pays occidentaux suivant le principe qu'on peut qualifier aujourd'hui de cercle vicieux de l'automobile (Dupuy, 2011; *Vivre en ville*, s.d.). Le développement des territoires suburbains de faible densité autour des axes autoroutiers où les types d'usage et d'activités sont ségrégués rend essentiellement inévitable le recours à l'automobile pour la majorité des déplacements quotidiens puisque les alternatives ne sont que très peu compétitives en termes de temps et d'accessibilité. Suivant ces développements, les routes atteignent rapidement la saturation. Malheureusement, pour « régler » ces problèmes de congestion, les investissements sont réalisés principalement dans le développement de nouveaux axes routiers afin « d'alléger » la pression sur les routes existantes. À court terme, l'augmentation de la capacité routière entraîne une réduction des coûts (en temps) des déplacements qui a alors pour effet à moyen terme de générer davantage de déplacements, saturant à nouveau le réseau routier. À plus long terme, l'étalement urbain au-delà des frontières existantes amène davantage d'automobilistes sur les routes nouvellement construites, empirant davantage la congestion. Ce principe de « demande induite », vient boucler le cercle vicieux de la dépendance automobile.

L'adoption par la population d'un tel système de mobilité est encouragée depuis les années 50 par une publicité et un marketing fort de l'automobile et du mode de vie qui est associé. Un tel marketing, jouant sur les fonctions utilitaires et pratiques de la voiture, mais aussi largement sur les émotions positives qu'elle procure et sur la symbolique qu'elle représente, aurait contribué à rendre irrésistible la voiture (Stokes & Hallett, 1992). Après des décennies de marketing favorable, la voiture comporte un aspect culturel et normatif qui alimente une résistance populaire et politique importante au changement de paradigme.

L'automobile est aujourd'hui perçue comme un outil essentiel à la participation à la vie sociale et économique pour la grande majorité de la population, à l'exception peut-être des résidents des quartiers urbains densément peuplés. Même dans ces milieux urbains où les lieux d'activités sont moins dispersés et les solutions de rechange sont multiples et généralement efficaces, la voiture, soutenue par ce marketing, est largement perçue comme un besoin essentiel. Ceci nous amène à cette idée que la dimension structurelle de la dépendance collective à l'automobile, combinée à ses dimensions normative et culturelle, pourrait aussi entraîner une dépendance psychologique chez l'individu. Ce concept a été exploré empiriquement pour la première fois par les chercheurs néerlandais Tertoolen, Van Kreveld et Verstraten (1998). Dans leur expérimentation, les participants, informés des conséquences de leur utilisation de la voiture sur l'environnement et sur leurs finances personnelles, avaient tendance à altérer leurs attitudes envers la voiture ou

l'environnement plutôt que de changer leur comportement, pour éviter d'entrer en dissonance cognitive. Tertoolen *et al.* (1998, p. 181) concluent :

*« L'automobile est trop fortement liée au sentiment d'indépendance et à son côté pratique pour qu'un tel changement se produise. Les conducteurs entretiennent plusieurs attitudes positives liées à différents avantages individuels perçus de l'utilisation de l'automobile alors qu'il n'y a qu'un nombre limité d'attitudes négatives liées aux désavantages collectifs de son utilisation. »<sup>3</sup>*

Ils confirment ainsi une forme de dépendance psychologique à l'utilisation de la voiture qui amène une importante résistance aux changements, et ce, même en présence d'alternatives de transport efficaces.

En somme, lorsque l'utilisation de la voiture devient la méthode par défaut pour combler les différents besoins humains (physiologique et psychologique), guidée par un contexte territorial favorable, un marketing soutenu et la perception de normativité du comportement, il s'en suit une forme de dépendance qui amène les individus à rationaliser, défendre et persister dans leur comportement au point de ne plus percevoir les alternatives comme viables. À titre d'exemple, la voiture est perçue par beaucoup comme le seul moyen de combler le besoin d'indépendance (du temps, de l'espace, des autres, etc.), un besoin fortement valorisé dans les sociétés occidentales. Jensen (1999) soulève le paradoxe suivant : en percevant la voiture comme seule façon de combler ce besoin d'indépendance, l'individu développe en réalité une forme de dépendance à celle-ci.

### 2.3.3.2 Modélisation de la possession automobile

La modélisation de la possession automobile est un champ de recherche très étudié en transport, notamment parce que la possession automobile est une variable importante à prendre en compte dans les exercices de planification des transports par les autorités publiques. La courte revue présentée ici s'appuie sur deux revues comparatives des modèles de possession automobile, soient la revue d'un large éventail de modèles, agrégés et désagrégés, par De Jong, Fox, Daly, Pieters et Smit (2004) et la revue des modèles désagrégés de Anowar, Eluru et Miranda-Moreno (2014).

#### Les modèles agrégés

De Jong *et al.* (2004) classifient les modèles agrégés en trois catégories : les modèles agrégés par séries temporelles, les modèles agrégés par cohorte et les modèles agrégés de marché. **Les modèles agrégés par séries temporelles** modélisent, à l'aide de fonctions présentant une courbe sigmoïde, l'évolution dans le temps de la possession automobile à l'échelle des villes, régions ou pays en utilisant comme intrant principal le niveau de revenu ou le produit intérieur brut (PIB). Les travaux de Dargay et Gatley (1999) et Dargay, Gatley et Sommer (2007) sont un exemple de ce type de modèle. **Les modèles agrégés par cohorte** s'appuient sur une segmentation de la population par tranche de 5 ans pour ensuite les faire évoluer dans le futur. Le niveau de motorisation de chaque cohorte est déterminé par l'évolution des taux de possession de permis de conduire et la croissance de leur niveau de revenu. Finalement, **les modèles agrégés de marché** font en quelque sorte vivre les flottes de véhicules en estimant le nombre de véhicules

---

<sup>3</sup> Traduction libre.

vendus (nouveaux véhicules), le nombre de véhicules remisés et évidemment, la flotte existante, laquelle peut être découpée par type de véhicule, par âge des véhicules et par type de carburant. Les exemples donnés par De Jong et al. (2004) sont le modèle britannique TRIMOVE et le modèle danois ALTRANS.

Finalement, un dernier type de modèle agrégé n'est pas mentionné par De Jong et al. (2004), il s'agit des **modèles statiques agrégés par division géographique** tel que celui présenté par Clark (2007) et par Lansley (2016). La description de ce type de modèle est importante puisque celui-ci est envisagé dans la présente proposition pour évaluer l'influence de l'offre de mobilité collective et partagée sur la possession automobile dans le grand Montréal. Clark (2007) utilise des données de recensement du Royaume-Uni, pour modéliser le taux de possession automobile par ménage à l'échelle des circonscriptions électorales (« electoral ward »). Les deux seules variables prédictives utilisées sont le revenu net et la densité de population comme proxy général d'accessibilité.

#### Les modèles désagrégés

La revue compréhensive d'Anowar, Eluru, et al. (2014) des modèles désagrégés classifient ceux-ci en quatre grandes catégories selon le type de représentation de la possession automobile. Bien que les auteurs ne représentent pas ces catégories de cette façon, celles-ci peuvent être illustrées dans une matrice deux par deux comme sur le Tableau 1.

Tableau 1. Classification des modèles désagrégés de possession automobile depuis Anowar, Eluru, et al. (2014)

|                   |                    |
|-------------------|--------------------|
| Exogène statique  | Exogène dynamique  |
| Endogène statique | Endogène dynamique |

Les **modèles exogènes statiques** sont les plus simples, tentant de modéliser la possession automobile (nombre de véhicules dans le ménage) comme une décision indépendante des autres décisions (choix de localisation résidentielle, niveau d'utilisation des véhicules) à un seul moment dans le temps comme dans les modèles de Bhat et Pulugurta (1998) ou encore Guo (2013). Ce type de modèle peut aussi tenter de modéliser le mixte de véhicules possédés par les ménages (VUS, voitures, véhicules électriques, etc.).

Les **modèles endogènes statiques** visent à modéliser de façon conjointe plusieurs décisions intrinsèquement liées à la possession automobile comme son niveau d'utilisation (kilomètre parcouru) et sa fréquence d'utilisation. Anowar, Eluru, et al. (2014) incluent aussi dans cette catégorie les modèles tentant de prendre en compte le processus d'auto-sélection résidentielle des ménages. Selon ce principe, il serait en effet erroné de considérer les variables du milieu bâti, d'accessibilité et d'utilisation du sol uniquement comme prédicteurs de la possession automobile alors que la possession automobile d'un ménage (et ses attitudes à l'égard de l'automobile) aurait une influence sur le choix de la localisation résidentielle (Bhat & Guo, 2007).

Les **modèles exogènes dynamiques** considèrent l'évolution de la flotte de véhicule d'un ménage dans le temps (en type et en nombre de véhicules) en modélisant par exemple les décisions liées à l'achat, la vente et la durée de possession des véhicules. Ce type d'analyse permet notamment d'explorer l'influence des stades de vie des ménages sur la motorisation. En l'absence de données de panels permettant de suivre les mêmes ménages dans le temps, certains chercheurs se sont

rabattus sur l'utilisation de la méthode par *pseudo-panel* où des ménages synthétiques sont suivis dans le temps en utilisant les données de plusieurs vagues successives d'enquêtes. Anowar, Eluru et Miranda-Moreno (2016) ont ainsi utilisé cette méthode pour joindre ensemble les données des enquêtes Origine-Destination de 1998, 2003 et 2008 pour la région de Montréal.

Finalement, **les modèles endogènes dynamiques** considèrent l'évolution dans le temps de la possession automobile comme endogène, étant influencée et influençant les décisions d'usage des véhicules.

Le Tableau 2 liste les modèles mentionnés ci-dessus et utilisés dans la littérature pour chacune des approches de modélisation.

Tableau 2. Résumé des approches de modélisation, des types de modèles et des exemples d'application.

| Approche                       | Modèles utilisés  | Exemples récents   |
|--------------------------------|---|--|
| Agrégé - dynamique             | Par série temporelle  | Dargay et al. (2007)   |
|                                | Par cohorte   |  |
|                                | De Marché   |  |
| Agrégé - statique              | Régression multiple   | Clark (2007)   |
|                                | Régression géographiquement pondérée (GWR)                      | Clark (2007)   |
| Désagrégée – exogène statique  | Régression multiple   | Klincevicius, Morency et Trépanier (2014)                        |
|                                | Régression logistique binaire                                   | Delbosc (2013)   |
|                                | Logit ordonné (OL)  | Potoglou et Kanaroglou (2008)                                    |
|                                | Logit ordonné avec classe latente (LSOL)                        | Anowar, Yasmin, Eluru et Miranda-Moreno (2014)                   |
|                                | Probit ordonné (OP)   | Potoglou et Kanaroglou (2008)<br>Cao, Mokhtarian et Handy (2007) |
|                                | Régression logistique multinomial (MNL)                         | Potoglou et Susilo (2008)<br>Bhat et Pulugurta (1998)            |
|                                | Régression logistique multinomial avec classe latente (LSMNL)   | Anowar, Yasmin, et al. (2014)                                    |
|                                | Régression standard de Poisson                                  | Shay et Khattak (2012)   |
|                                | Régression négative binomiale                                   |  |
| Réseau de neurones artificiel  | Mohammadian et Miller (2002)                                    |  |
| Désagrégée – endogène statique | Modèles de choix discret multidimensionnels mixte               | Bhat et Guo (2007)<br>Pinjari, Pendyala, Bhat et Waddell (2011)  |
|                                | Probit binaire multivarié                                       | Yamamoto (2009)<br>Becker, Loder, Schmid et Axhausen (2017)      |
|                                | <i>Multiple discrete continuous extreme value (MDCEV)</i>       | Bhat et Sen (2006)   |
|                                | <i>Copula-based joint multinomial discrete-continuous model</i> | Bhat et Eluru (2009)   |

|                                    |   |  |
|------------------------------------|---|--|
|                                    | Modélisation par equation structurelle (SEM)                    | Van Acker et Witlox (2010)<br>Van Acker, Mokhtarian et Witlox (2014) |
| Désagrégée –<br>exogène dynamique  | Logit ordonné (OL)  |  |
|                                    | Logit ordonné généralisé (GOL)                                  | Anowar et al. (2016)   |
|                                    | Probit ordonné (OP)   | Matas et Raymond (2008)  |
|                                    | Fonction de défaillance (« hazard function »)                   | Mohammadian et Rashidi (2007)  |
|                                    | Modèle de régression aléatoire                                  | Nolan (2010)   |
| Désagrégée –<br>endogène dynamique | <i>Copula-based joint multinomial discrete-continuous model</i> | Eluru, Bhat, Pendyala et Konduri (2010)                              |
|                                    | <i>Probit multinomial</i>                                       | Paleti, Bhat, Pendyala et Goulias (2013)                             |
|                                    | Modélisation par équation structurelle (SEM)                    |  |
|                                    | Modélisation par équation simultanée                            | Kitamura (2009)  |

#### Facteurs d'influence de la possession automobile

Les facteurs d'influence de la motorisation étudiés dans la littérature dépendent évidemment des données disponibles et des approches de modélisation utilisées. Par exemple, les modèles agrégés n'utilisent que très peu de variables en raison des problèmes de corrélation et du niveau macro de ces approches. À l'inverse, un très grand nombre de variables sont utilisées dans les modèles désagrégés.

La modélisation désagrégée de la possession automobile inclut généralement des facteurs provenant de trois grandes catégories : les variables socio-démographiques du ménage (revenus, composition, etc.), les variables de l'environnement (environnement bâti, offre de transport, accessibilité, etc.) et les variables attitudinales, lesquelles sont beaucoup plus rarement disponibles que les deux premières catégories. Si les variables du ménage ont une influence considérable sur la motorisation, les variables de l'environnement intéressent particulièrement les chercheurs parce qu'elles peuvent être modifiées par des politiques publiques pour tenter d'influencer les comportements de mobilité et les décisions de possession automobile des ménages.

L'ensemble des facteurs d'influence identifiés sont résumés dans le **Tableau 3** avec la direction d'influence (« + » indiquent que le facteur influence positivement la motorisation, « – » indique une influence négative et « + ou – » indique une ambiguïté dans la direction de l'effet et finalement ~ devant un signe + ou – indique que la relation semble plus complexe, mais avec une tendance dans une certaine direction). Chaque variable s'accompagne d'au moins un exemple dans la littérature.

Tableau 3. Synthèses des variables d'influence de la motorisation des ménages.

| Variable   | Effet    | Exemple dans la littérature  |
|--|----------|--|
| <b>Modèles agrégés</b>                           |          |  |
| Densité de population                            | -        | Dargay et al. (2007) Clark (2007)  |
| PIB/ Revenu                                      | +        | Dargay et Gately (1999); Dargay et al. (2007); Storchmann (2005) Clark (2007)  |
| % d'urbanisation                                 | + ou -   | Dargay et al. (2007) Storchmann (2005)   |
| Coûts de motorisation                            | -        | Storchmann (2005)  |
| <b>Variables sociodémographiques des ménages</b> |          |  |
| Revenu du ménage                                 | +        | Potoglou et Kanaroglou (2008), Bhat et Pulugurta (1998), Kim, H. S. et Kim (2004)  |
| Revenu du quartier                               | +        | Anowar et al. (2016)   |
| Taille du ménage                                 | ~+       | Kim, H. S. et Kim (2004), Bhat et Pulugurta (1998)   |
| Stade de vie                                     | Variable | Anowar et al. (2016)   |
| Nombre d'hommes                                  | +        | Anowar et al. (2016)   |
| Présence/nombre d'enfants                        | ~+       | Anowar et al. (2016), (Caulfield, 2011), Anowar, Yasmin, et al. (2014), Bhat et Pulugurta (1998), Kim, H. S. et Kim (2004) |
| Nb. de travailleurs temps plein                  | +        | Anowar et al. (2016), Bhat et Pulugurta (1998), Potoglou et Kanaroglou (2008)  |
| Nb. de travailleur temps partiel                 | + ou -   | Anowar et al. (2016), Bhat et Pulugurta (1998), Potoglou et Kanaroglou (2008)  |
| Type d'emplois                                   | Variable | Caulfield (2011)   |
| Nb. de détenteurs de permis de conduire          | +        | Anowar et al. (2016), Potoglou et Kanaroglou (2008), Kim, H. S. et Kim (2004)  |
| Nb. d'étudiants                                  | -        | Anowar et al. (2016), Van Acker et Witlox (2010)   |
| Nb. de personnes immobiles                       | -        | Anowar et al. (2016)   |
| Ethnicité  | Variable | Bhat, Sen et Eluru (2009)  |
| Dist. Domicile-travail                           | +        | Potoglou et Kanaroglou (2008), Anowar et al. (2016)  |
| <b>Variables de l'environnement</b>              |          |  |
| Taille de la ville                               | -        | Kim, H. S. et Kim (2004), Dieleman, Dijst et Burghouwt (2002)  |
| Quartiers urbains                                | -        | Bhat et Pulugurta (1998)   |
| Quartiers suburbains                             | +        |  |
| Quartiers ruraux                                 | +        |  |
| Densité (résidentielle, d'emplois et mixte)      | -        | Bhat et Guo (2007), Potoglou et Kanaroglou (2008), Van Acker et Witlox (2010)  |
| Mixité du bâti                                   | -        | Van Acker et Witlox (2010), Potoglou et Kanaroglou (2008)  |
| Design de l'environnement                        | Variable | Pinjari et al. (2011)  |
| <b>Offre de transport collectif</b>              |          |  |
| Nb d'arrêts de bus                               | -        | Potoglou et Kanaroglou (2008)  |

|                                   |          |  |
|-----------------------------------|----------|--|
| Longueurs des lignes de bus/méτρο | -        | Anowar et al. (2016)   |
| Distance station TC               | +        | Kim, H. S. et Kim (2004)   |
| Fréquence                         | -        | Becker et al. (2017)   |
| <b>Autres</b>                     |          |  |
| Stationnement                     | +        | Guo (2013)   |
| Résidence unifamiliale            | +        | Potoglou et Kanaroglou (2008)  |
| Attitudes                         | Variable | Becker et al. (2017), Van Acker (2010), Van Acker et al. (2014), Kim, S. H. et Mokhtarian (2018) |
| Style de vie                      | Variable | Van Acker et al. (2014)  |

#### 2.3.4 Méthodologie pour la première contribution

L'objectif **de la première contribution** est de documenter les interactions entre les multiples facteurs d'influence de la motorisation et de son évolution dans un écosystème de mobilité urbain changeant rapidement comme celui du grand Montréal. La méthodologie proposée vise à combiner les meilleures pratiques de modélisation désagrégées avec celles de la modélisation agrégée spatialement afin de broser un portrait plus complet de l'influence individuelle et collective de certains facteurs et de leur évolution dans les années récentes.

Une approche de modélisation agrégée à différente résolution géographique de l'évolution de la motorisation sera d'abord réalisée à l'aide de données d'immatriculation et de possession de permis de conduire obtenues auprès de la Société d'assurance automobile du Québec (SAAQ). Cette approche se démarque de la littérature existante pour deux raisons. Tout d'abord, l'utilisation de données administratives pour modéliser de façon agrégée l'évolution de la motorisation dans le temps n'a pas été trouvée dans la littérature scientifique. Ensuite, malgré les enjeux de corrélation généralement associés à ce type de modélisation, l'approche se démarque aussi en visant à explorer de quelle façon pourront être ajoutées des variables d'offre de transport (transport collectif et autres services de mobilité) aux variables de revenu et d'environnement bâti. Des approches comme la régression géographiquement pondérée (GWR) seront testées.

Par la suite, des approches de modélisation désagrégée seront testées à partir des données d'enquête Origine-Destination et en s'appuyant sur les meilleurs modèles suggérés par la revue de Anowar, Eluru, et al. (2014). Cette approche visera notamment à tenter d'isoler l'influence de l'exposition aux services de mobilité partagés (transport collectif, vélopartage, autopartage basé station et autopartage en libre-service) sur les choix de possession automobile des ménages. De plus, une formulation dynamique sur plusieurs années (si les données le permettent) sera aussi envisagée afin d'évaluer l'évolution dans le temps de l'influence de ces services sur la motorisation des ménages et de leurs interactions avec les variables sociodémographiques et de l'environnement bâti. Finalement, l'inclusion de variables attitudinales sera envisagée via l'intégration de données de l'enquête 2019 de la Ville de Montréal dont le questionnaire a été développé par la Chaire Mobilité. Cette enquête menée en avril et mai 2019 visait à mieux comprendre les raisons sous-jacentes à la possession et à l'utilisation de l'automobile par les ménages. Le questionnaire comprenait des questions permettant de broser un portrait des comportements de mobilité des ménages et des questions sur les attitudes à l'égard de l'utilisation et de la possession automobile.

Un schéma méthodologique est présenté à la Figure 4.

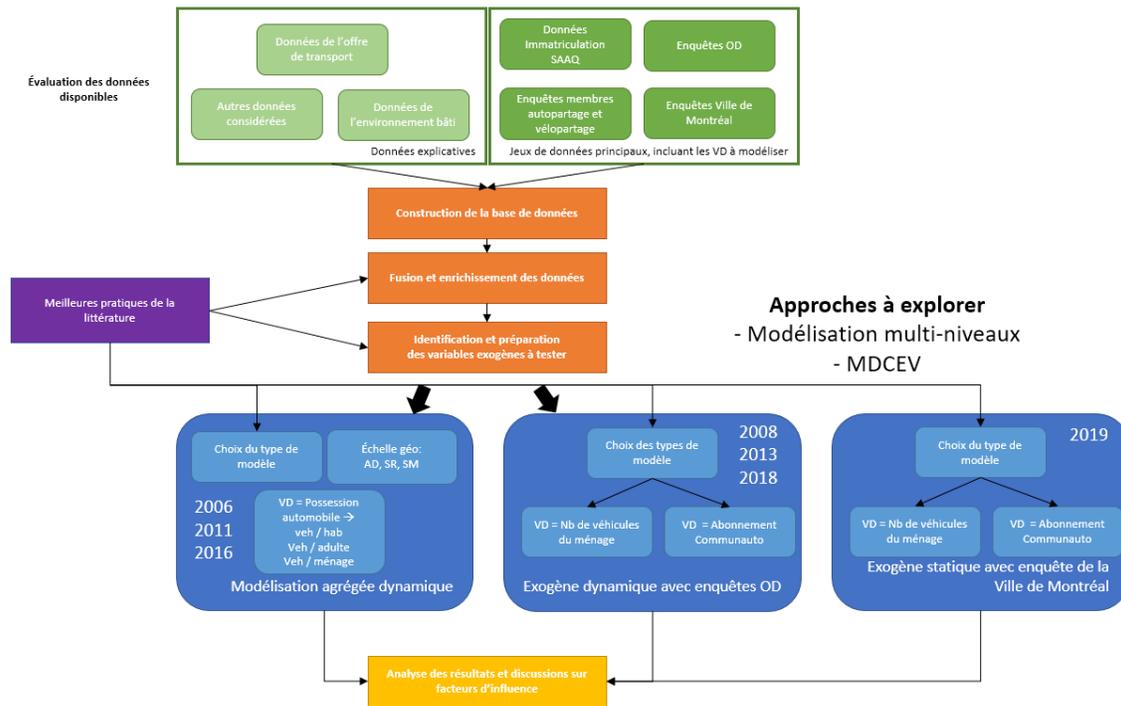


Figure 4. Schéma méthodologique préliminaire de la première contribution

### 2.3.4.1 Données et outils

Plusieurs ensembles de données seront mis à contribution pour développer les modèles décrits ci-dessus. Les ensembles de données envisagés sont détaillés dans le Tableau 4. Dans la mesure du possible, les données seront obtenues pour les années de références suivantes : 2006, 2011, 2016 correspondants aux années de recensement pour la modélisation agrégée et 2008, 2013, 2018 pour les approches de modélisation désagrégées, soient les années des enquêtes OD. Ces données, pour la plupart déjà détenues par la Chaire Mobilité, seront incorporées dans une seule et même base de données géospatiale à l'aide des outils PostgreSQL et PostGIS. Les processus de fusion de données seront envisagés afin d'enrichir les jeux de données principaux à partir des données secondaires. Par la suite, les approches de modélisation détaillées ci-dessus seront réalisées avec le logiciel R et ses *packages* appropriés.

Tableau 4. Ensembles de données qui seront utilisés dans la première contribution

| <b>Variables de l'environnement</b>   |   |   |
|---|---|---|
| <b>Recensement Canadien</b>   | Données agrégées sur la population, le nombre d'emplois, le revenu, type d'unité résidentielle. | Entente de partage avec Polytechnique                                   |
| <b>Usage du sol</b>   | Mixité d'usage des sols   | Données ouvertes de la CMM  |
| <b>Résultats électoraux</b>   | Proxy pour les préférences non observées à l'égard des modes de transport et du style de vie    | Élection Québec   |
| <b>Rôle foncier</b>   | Type d'unité résidentielle  | Données ouvertes  |
| <b>Réseau routier</b>   | Variables du design de l'environnement  | Open Street Map   |
| <b>Points d'intérêt amplifiés EPOI</b>                                      | Densité de services et de points d'intérêts   | Entente entre Polytechnique et DMTI Spatial                             |
| <b>Variables sociodémographiques des ménages et variables attitudinales</b> |   |   |
| <b>Enquête OD 2003, 2008, 2013 et 2018<sup>1</sup></b>                      | Âge, sexe, composition du ménage, permis de conduire, comportement de mobilité, etc.            | Entente de partage avec Polytechnique                                   |
| <b>Enquête de Vélo Québec pour l'État du vélo</b>                           | Caractéristiques des cyclistes utilitaires à Montréal   | Entente à obtenir avec Vélo-Québec                                      |
| <b>Enquête interne de Communauto sur ses membres</b>                        | Caractéristiques des membres Communauto selon le type d'abonnement.                             | Entente de partage avec Communauto                                      |
| <b>Variables de l'offre de mobilité</b>                                     |   |   |
| <b>Stations BIXI</b>  | Localisation des stations BIXI  | Données ouvertes de BIXI  |
| <b>Stations Communauto</b>  | Localisation des stations Communauto  | Entente de partage avec Communauto                                      |
| <b>Zone autorisée aux VLS</b>   | Zone de disponibilité des services d'autopartage en libre-service                               | Données en ligne de Communauto et de Car2Go                             |
| <b>Données de transaction de VLS</b>  | Données de transaction de VLS afin de caractériser plus précisément l'offre de VLS              | Entente avec Communauto et données collectées par la Chaire pour Car2Go |
| <b>Réseau cyclable</b>  | Offre d'infrastructures cyclables   | Données ouvertes Ville de Montréal                                      |
| <b>GTFS / Horaires historiques de bus</b>                                   | Horaires des services de transport collectif. Indices d'accessibilité en transport collectif.   | Données ouvertes des Sociétés de transport de la région                 |

### 2.3.5 Aperçu des tendances de motorisation

Pour évaluer les tendances de motorisation, le nombre d'automobiles (voitures et camions légers<sup>4</sup>) de promenade<sup>5</sup> immatriculées au Québec par millier d'adultes (16 ans et plus, soit l'âge légal pour conduire) est choisi comme principal indicateur. Celui-ci est estimé en combinant les données d'immatriculation provenant de la Société d'assurance automobile du Québec (SAAQ) pour la période de 1980 à 2017 pour l'ensemble du Québec (SAAQ, 2018b) et de 2000 à 2017 par région administrative (SAAQ, 2018b) et les données d'estimations annuelles de population de Statistique Canada (2018).

Afin de bien observer la progression de la motorisation, la Figure 5 illustre l'évolution du taux de motorisation, mesuré en véhicules par 1 000 adultes, pour l'ensemble de la province entre 1980 et 2017. Le taux de possession de permis de conduire par genre sur la même période est aussi illustré et montre un plafonnement depuis 2004.

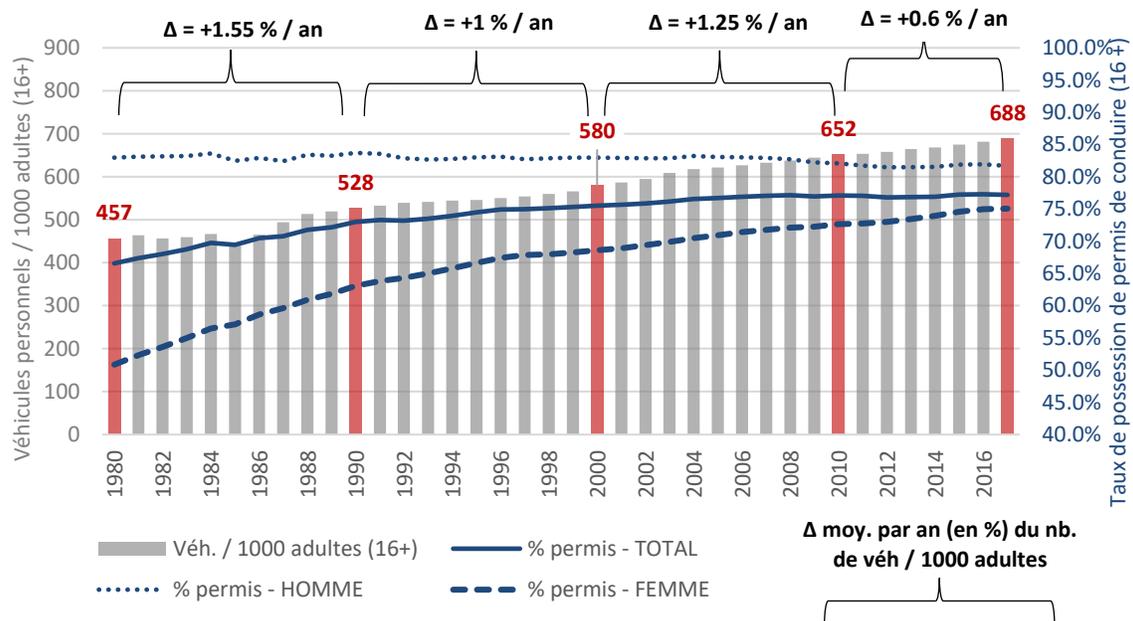


Figure 5. Taux de motorisation 2000 et 2017. Source : Le nombre de véhicules de promenade provient des données de la SAAQ (2018a) et les estimations de population de Statistique Canada (2018). Calcul par les auteurs.

Dans l'ensemble du Québec, entre 2000 et 2017, le nombre de voitures et camions légers à usage personnel a augmenté de 38 %, ajoutant en moyenne 77 000 véhicules annuellement sur les routes. Pour la même période, la population adulte a augmenté de 16,5 %.

Toutefois, cette croissance de la motorisation n'est pas uniforme à travers le territoire et varie entre les milieux urbains, suburbains et ruraux. La Figure 6 permet d'observer l'évolution de la motorisation en véhicules par adultes entre 2000 et 2017 pour les 17 régions administratives du Québec et pour l'ensemble de la province. À l'exception du Nord-du-Québec, les régions plus

<sup>4</sup> La SAAQ regroupe dans la catégorie « camions légers » les véhicules utilitaires sports (VUS), les pick-up et les petites camionnettes.

<sup>5</sup> La SAAQ identifie les « véhicules de promenade » comme ceux détenus par les individus et dédiés à l'usage personnel et non commercial.

rurales et plus éloignées affichent, sans surprise, des taux de motorisation plus élevés que celles plus urbanisées de la Capitale Nationale et du sud de la province.

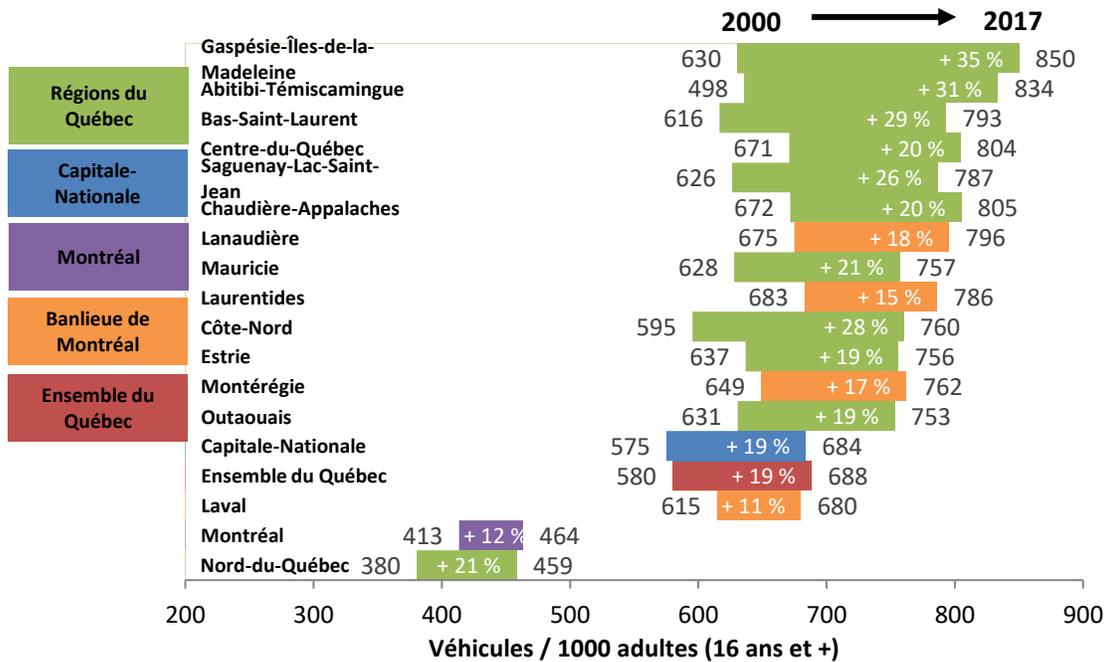


Figure 6. Motorisation mesurée en véhicules de promenade par 1 000 adultes par région administrative. 2000-2017. Sources : SAAQ (2018b) et Statistique Canada (2018).

La Figure 6 permet aussi de constater que la croissance de la motorisation depuis 2000 est plus marquée dans les régions rurales du Québec (moyenne de 22,6 %), particulièrement dans les régions éloignées comme l’Abitibi-Témiscamingue (+31 %) et la Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine (+35 %). La croissance de la motorisation dans les quatre régions limitrophes de Montréal (moyenne de 16,3 %) est légèrement sous la moyenne québécoise (18,8 %) et sous celle de la région de la Capitale-Nationale (18,9 %). Les plus faibles croissances sont observées à Laval (10,7 %) et sur l’île de Montréal (12,2 %).

En somme, les données analysées permettent de conclure en une croissance soutenue de la motorisation depuis le début 1980 et laissent présager que le plafonnement de la motorisation ne semble pas encore atteint. Considérant que la possession automobile est un prédicteur important de l’utilisation de l’automobile (De Jong et al., 2004), favorisant le choix de l’automobile pour les déplacements et augmentant les distances parcourues avec ce mode au détriment des alternatives (Caulfield, 2011; Dieleman et al., 2002), cette tendance à la hausse de la motorisation risque d’exacerber les nombreuses externalités qui découlent de l’automobilité.

## 2.4 Modélisation des interactions entre les modes de transport par l'intégration de sources diversifiées de données

- Par: Élodie Deschaintres, doctorat
- Supervision: Pre Catherine Morency / Pr Martin Trépanier
- Contexte: Chaire de recherche du Canada sur la mobilité des personnes

### 2.4.1 Introduction

Depuis déjà quelques années, la mobilité urbaine connaît de grandes transformations. En particulier, les options de transport ne cessent de se multiplier : des modes partagés tels que le covoiturage, l'autopartage ou le vélopartage, ainsi que des nouvelles formes de services de transport collectif et/ou à la demande (taxi collectif, TNC tels que Uber ou Lyft, microtransit, micromobilité, etc.), sont venus compléter les modes classiques. Cette diversification de l'offre de transport semble peu à peu entraîner une modification des comportements de déplacement : la population, surtout parmi les nouvelles générations (Kuhnimhof et al., 2012), tend à utiliser une plus grande variété de modes de transport (Buehler & Hamre, 2014). Ces tendances ont également été accompagnées par l'émergence de nouveaux concepts de mobilité : les termes « cocktail transport », « mobilité intégrée » (ou « Mobility as a Service » en anglais), mais aussi les notions de « multimodalité » (disponibilité dans un lieu, ou utilisation pendant une période donnée de différents modes de transport) et d'« intermodalité » (combinaison de plusieurs modes de transport dans un même déplacement) deviennent de plus en plus à la mode dans le domaine de la mobilité urbaine. Par ailleurs, les bénéfices potentiellement apportés par de telles transformations, notamment en vue de réduire la dépendance à l'automobile (Vivre en Ville, 2018), ont conduit à un véritable consensus social (Ferraris, 2018) et scientifique (Spickermann et al., 2014) sur le fait que la mobilité du futur sera multimodale.

Cependant, malgré cette volonté croissante de tendre vers une mobilité plus multimodale, les déplacements des Québécois demeurent majoritairement unimodaux et centrés sur l'automobile (Lavolette & Morency, 2019). De plus, bien que les statistiques d'achalandage rapportent une utilisation croissante du transport en commun (Société de transport de Montréal, 2019) et des modes actifs (Vélo Québec, 2015) à Montréal, une évolution différente est observée en région. Ainsi, la proportion des déplacements domicile-travail effectués avec des modes de transport durables dans le Grand Montréal n'a que très faiblement progressé entre 2001 et 2016 (Communauté métropolitaine de Montréal, 2018). En Amérique du Nord, certaines villes ont même vu l'achalandage de leur réseau de transport en commun diminuer (Feigon & Murphy, 2018; Graehler Jr et al., 2019). Par conséquent, des questions se posent sur le rôle de chaque mode de transport dans la mobilité multimodale : Quel est l'effet de la diversification de l'offre de transport sur l'achalandage des modes existants et la répartition modale ? Les modes de transport émergents sont-ils complémentaires ou compétitifs aux modes classiques ?

### 2.4.2 Problématiques

Plusieurs problématiques peuvent être soulignées en tentant de répondre à ces questions de recherche. Premièrement, les connaissances que l'on a sur les comportements multimodaux et les motivations et caractéristiques associées sont relativement limitées (Gebhardt et al., 2016). Chaque mode de transport étant le plus souvent analysé de manière indépendante, ses interactions avec les autres modes restent mal comprises. De plus, de nouveaux outils sont nécessaires pour permettre une planification intégrée de l'ensemble des modes. Les villes ont exprimé des besoins en matière de développement d'indicateurs de multimodalité et de complémentarité entre les modes (Diana et al., 2018). De même, les méthodes d'inférence

causale, qui permettraient de mesurer l'impact des modes émergents sur les modes classiques à différents horizons spatio-temporels (région versus agglomération, court terme versus long terme), ainsi que les méthodes d'évaluation des effets de stratégies de planification sur la répartition modale, sont encore peu développées (Diana & Pirra, 2016; Fuller et al., 2013). En outre, la majorité des modèles de prévision de la demande de transport n'incluent qu'un nombre limité de modes. Ces limitations sont principalement liées à un manque de données longitudinales et multimodales. En effet, il n'existe pas de base de données unique décrivant l'utilisation continue de tous les modes de transport en même temps. Ainsi, plusieurs bases de données doivent être combinées pour pouvoir étudier la mobilité multimodale.

### 2.4.3 Objectifs

Face à ces problématiques, cette recherche vise à mettre en évidence, comprendre, mesurer et modéliser les interactions entre différents modes de transport à partir de sources variées de données. Trois sous-objectifs peuvent être formulés comme suit :

- Élaborer des procédures automatisées de valorisation et d'enrichissement de données provenant d'enquêtes ménages Origine Destination et de flux passifs afin de décrire de manière longitudinale l'utilisation de différents modes de transport
- Proposer un cadre conceptuel et une boîte à outils afin de qualifier et quantifier les interactions entre les modes de transport au niveau systémique
- Développer un modèle longitudinal pour prédire la demande multimodale de transport (génération + répartition modale de la demande + spatialisation)

Dans le cadre du premier sous-objectif, des méthodes de pondération, de projection et des indicateurs seront développés en vue de comparer puis de combiner les deux principales sources de données utilisées dans cette recherche (enquête Origine Destination et données passives).

### 2.4.4 Revue de littérature sur l'intégration de données

Au cours des dernières années, le rapide développement des technologies et l'évolution des systèmes d'information et de communication ont permis la mise à disposition d'une grande variété d'ensembles de données issues de sources multiples, incluant des données GPS, des données de cartes à puce et d'autres données transactionnelles (Munizaga et al., 2014), des données de capteurs (El Faouzi & Klein, 2016) ou encore des données de téléphonie mobile et de réseaux sociaux comme Twitter (Lovelace et al., 2016). Cette disponibilité croissante d'informations offre de nouvelles opportunités dans les domaines de la science des données et de l'analyse de la mobilité. Pourtant, la recherche en transport souffre toujours d'un manque de données longitudinales et multimodales. D'un côté, les enquêtes traditionnelles collectent des déplacements tous modes confondus. Toutefois, les modes alternatifs et partagés sont souvent sous-représentés. Outre les problèmes liés à l'échantillonnage et aux biais de réponse, les données d'enquêtes sont également transversales : les informations sont généralement recueillies pour un jour moyen de semaine alors que la variabilité des comportements de mobilité a été amplement démontrée (Verreault & Morency, 2011). De l'autre côté, les flux de données passifs sont longitudinaux, mais ils sont enregistrés indépendamment pour chaque mode de transport. De plus, ces données sont unidimensionnelles (centrées sur la mobilité, sans informations causales) et plus difficiles à traiter (Cherchi & Bhat, 2018).

La fusion (ou l'intégration) de données est une solution proposée dans la littérature pour tirer parti de différentes sources et compenser leurs limites respectives. Plusieurs techniques existent et ont été classifiées (Castanedo, 2013; Khaleghi et al., 2013), que ce soit pour des fusions intra-

ou inter-domaine (Zheng, 2015). Toutefois, le nombre d'exemples d'intégration de données en transport restent relativement limité. La plupart des cas d'application de méthodes de fusion sont recensés dans le domaine de l'ingénierie du trafic routier et des systèmes de transports intelligents, spécialités dans lesquelles l'utilisation de capteurs est répandue (El Faouzi & Klein, 2016). Des travaux de comparaison et de validation de différentes sources de données en transport ont également été réalisés (Lovelace et al., 2016; Munizaga et al., 2014; Spurr et al., 2015). En outre, quelques recherches ont porté sur la combinaison d'enquêtes traditionnelles et de données de cartes à puce, notamment pour déterminer des attributs absents dans les données de cartes à puce tels que le motif de déplacement (Kusakabe & Asakura, 2014; Zhong et al., 2014). Néanmoins, aucun auteur n'a tenté d'intégrer la variabilité des comportements observée à partir de données passives aux données d'une enquête traditionnelle.

Ce nombre restreint d'exemples en transport s'explique par les multiples défis impliqués par l'intégration de données (Bayart et al., 2009). Certaines difficultés sont liées aux méthodes disponibles, souvent complexes et nécessitant une grande puissance de calcul. Le choix de la méthode et la validation de sa performance sont également des enjeux. D'autres défis concernent le stockage et l'accès aux données (peu de chercheurs bénéficient d'assez de données pour analyser simultanément différents modes de transport), ou encore l'hétérogénéité des protocoles et des formats utilisés pour recueillir les informations (Morency et al., 2018). Les bases de données peuvent en effet être incompatibles au niveau spatial, temporel ou sémantique. De même, les unités choisies peuvent être différentes d'un ensemble de données à l'autre (problème de commensurabilité). Par conséquent, de nombreux chercheurs s'accordent à dire que de nouveaux outils sont nécessaires pour permettre l'intégration de différentes sources de données et mieux définir le rôle des données traditionnelles et émergentes (Cherchi & Bhat, 2018).

## 2.4.5 Méthodologie

### 2.4.5.1 Données utilisées

Les deux principales sources de données impliquées dans cette recherche sont les données de l'enquête ménage de déplacements de Montréal (dite enquête Origine-Destination) et des données passives sur l'achalandage de différents modes de transport. Dans les deux cas, la période d'étude s'étend sur 16 semaines, de septembre à décembre, ce qui correspond à la saison d'automne. Les jours fériés ont été supprimés car ces journées n'ont pas été enquêtées.

Les enquêtes Origine-Destination les plus récentes sont utilisées, c'est-à-dire celle de 2008, pour laquelle des déplacements de semaine et de fin de semaine ont été enregistrés, et celle de 2013, pour laquelle seuls des déplacements de semaine ont été enquêtés. Les données de l'enquête de 2018 ne sont pas encore disponibles (en cours de traitement) mais elles devraient pouvoir être utilisées dans un futur plus ou moins proche, au moins pour pouvoir valider les exercices de projection. Le territoire d'étude sur lequel ces données ont été recueillies correspond à toute la région métropolitaine de Montréal.

De plus, différentes bases de données passives sont exploitées pour décrire l'utilisation de différents modes de transport : des données des cartes à puce pour le métro et le bus (STM), des données transactionnelles pour le taxi (Taxi Diamond), le vélopartage (BIXI) et l'autopartage (Communauto, Car2Go), ainsi que des données de comptage pour les modes actifs (éco-compteurs, données en ligne). La Chaire Mobilité bénéficie de plusieurs années de données mais l'année 2016 est particulièrement exhaustive. Le territoire sur lequel ces données ont été recueillies dépend de la zone de desserte du mode de transport considéré. Néanmoins, la zone sur laquelle la plus grande densité de services de mobilité (et donc aussi la plus grande densité

d'informations) est disponible correspond globalement à l'agglomération A11. Cette agglomération, qui équivaut à une zone de desserte des taxis dans la réglementation actuelle, est représentée sur la carte de la Figure 7.

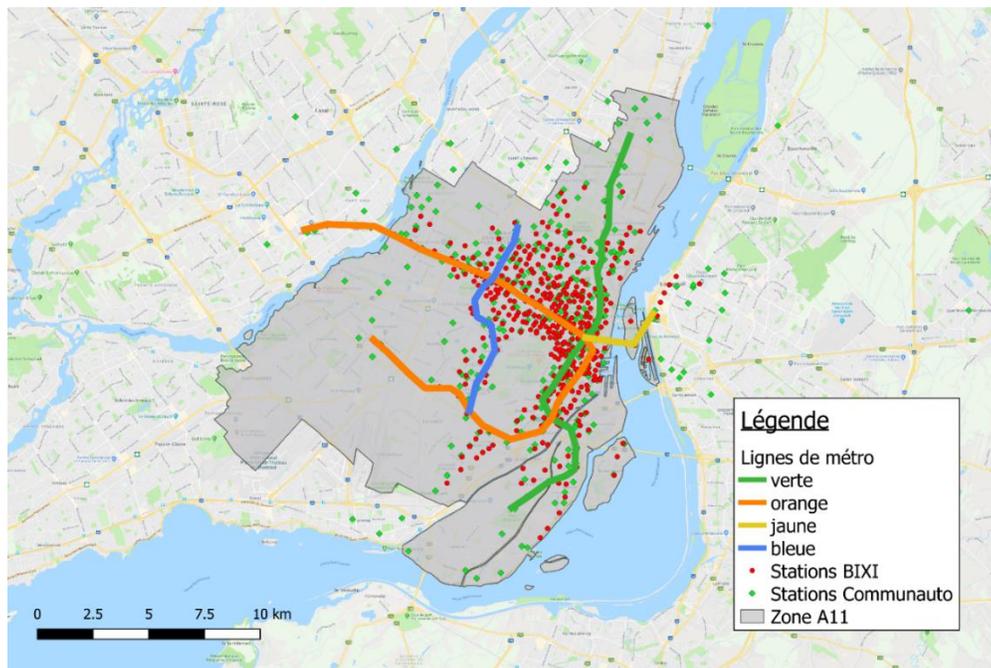


Figure 7. Services de transport à l'intérieur de la zone de desserte A11

Ces deux types de données présentent de nombreuses différences répertoriées dans le Tableau 5 ci-dessous. Toutes ces divergences rendent a priori ces deux sources de données incomparables. Toutefois, cette recherche vise à mettre en lumière des similarités au niveau des comportements de mobilité enregistrés et permettra de combiner les avantages de chaque source. Ainsi, les enquêtes Origine-Destination et les données passives seront rendues complémentaires dans un processus d'intégration où la multimodalité des données de l'enquête sera combinée à la longitudinalité des flux passifs.

Tableau 5. Comparaison de l'enquête Origine-Destination et des données passives

|                              |               | ENQUÊTE OD  | DONNÉES PASSIVES  |
|------------------------------|---------------|---|---|
| <b>Population collectée</b>  |               | Échantillon pondéré<br>Personnes résidentes du territoire d'enquête | Inventaire complet<br>Personnes résidentes et touristes |
| <b>Période d'observation</b> |               | 1 journée d'automne<br>(semaine et fin de semaine)                  | Toute l'année   |
| <b>Territoire</b>            |               | Région métropolitaine de Montréal                                   | Zone de desserte du mode de transport considéré         |
| <b>Modes de transport</b>    | <b>Nombre</b> | Plusieurs   | 1 seul  |
|                              | <b>Types</b>  | Modes classiques  | Modes classiques et émergents                           |
| <b>Unité d'usage</b>         |               | Déplacement   | Transaction, compte, etc.                               |

#### 2.4.5.2 Schéma méthodologique global

La méthode proposée, illustrée à la Figure 8, est composée de quatre grandes étapes.

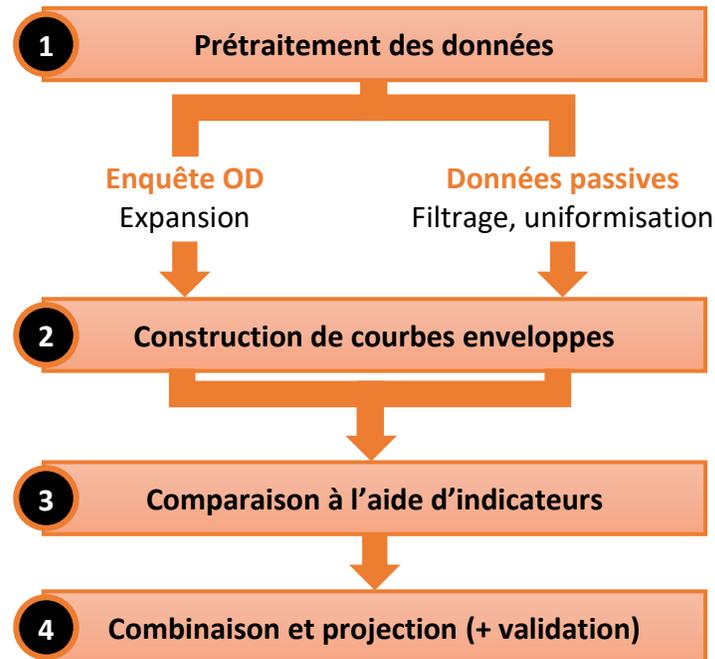


Figure 8. Cadre méthodologique

Premièrement, les deux sources de données sont prétraitées et enrichies de sorte à dépasser la notion de journée moyenne et à analyser l'évolution de la mobilité multimodale sur toute la période d'automne. Une méthode d'expansion de l'enquête Origine-Destination doit ainsi être appliquée pour la rendre longitudinale : la procédure de repondération développée est expliquée en détails à la section suivante. Contrairement à l'enquête Origine-Destination, les données passives sont déjà longitudinales. Cependant, elles présentent d'autres défauts, comme des données manquantes ou erronées, ou des formats et des unités différentes entre les bases. Un travail de filtrage et d'uniformisation doit donc être réalisé en amont.

À la suite de cette première étape de prétraitement des deux sources de données, des courbes que nous avons appelées « courbes enveloppes de la mobilité » peuvent être construites afin d'analyser l'évolution dans le temps de l'achalandage tous les modes de transport. Chaque courbe est obtenue en agréant les déplacements à l'échelle quotidienne, c'est-à-dire en sommant les déplacements sur chaque journée de la période d'automne, de septembre à décembre (en retirant les jours fériés). L'opération fournit une série chronologique de 108 jours. Différentes courbes peuvent être estimées par source de données (enquête OD versus données passives), par zone spatiale ou par mode de transport, pour les origines (déplacements produits) ou les destinations (déplacements attirés).

Les courbes obtenues pour les enquêtes Origine-Destination d'une part, et celles construites à partir des données passives d'autre part, peuvent ensuite être comparées au niveau longitudinal. Pour ce faire, différents indicateurs typiques des séries chronologiques issus de la théorie du traitement du signal peuvent être calculés afin de mesurer entre autres la périodicité, la variabilité ou la corrélation de ces courbes. Des ratios entre les courbes peuvent également être estimés, et leur stabilité dans le temps peut être examinée afin de tester si les deux types de données

capturent les mêmes fluctuations sur les quatre mois d'automne étudiés. Cette troisième étape permettra ainsi d'évaluer la représentativité du jour moyen et d'explorer la complémentarité potentielle des deux sources de données exploitées.

Enfin, la dernière étape consiste à combiner les deux sources de données dans le but de projeter la courbe enveloppe de la mobilité calculée à partir de l'enquête Origine-Destination en utilisant les données passives. Différents indicateurs de mesure de l'utilisation des modes de transport (par exemple, des parts modales en nombre, distance ou durée de déplacements), estimés sur un jour moyen à partir de l'enquête Origine-Destination, seront projetés ou annualisés à partir des changements prédits dans la population et des variations observées dans les données passives. Par conséquent, la méthode de projection développée permettra de suivre l'évolution de la répartition modale dans le temps.

#### 2.4.5.3 Procédure d'expansion de l'enquête Origine-Destination

La procédure utilisée pour expansionner l'enquête Origine-Destination est représentée sur la Figure 9 ci-dessous.

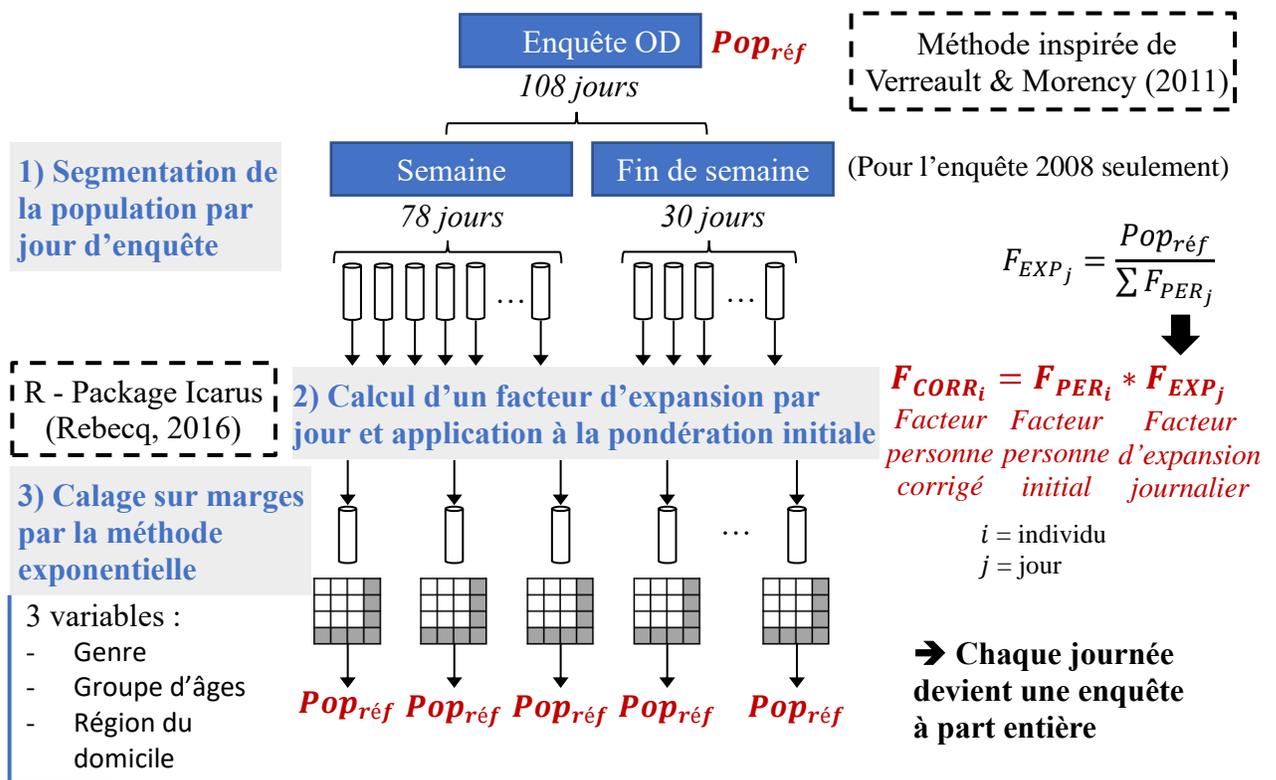


Figure 9. Méthode d'expansion de l'enquête Origine-Destination

Les données d'entrée de cette procédure sont les données de l'enquête Origine-Destination fournie par le MTQ ou l'ARTM. Cette enquête a été pondérée à partir des données du recensement de façon que la somme des facteurs de pondération relatifs aux personnes soit égale à la population de référence (représentative de la région métropolitaine de Montréal). Cette population est d'abord segmentée en fonction des journées sur lesquelles les déplacements ont été enregistrés, les jours de semaine et de fin de semaine étant séparés lorsque l'information est disponible (enquête 2008 mais pas 2013 ni 2018). Pour chacune des journées ainsi dissociées, un facteur d'expansion est calculé et appliqué à la pondération initiale de sorte qu'on retrouve un

nombre total de personnes égal à la population de référence dans chaque journée. On utilise ici la méthode d'expansion développée par Verreault et Morency (2011). Mathématiquement, cela revient à calculer un facteur personne corrigé en multipliant le facteur personne initial (qui corrige pour la représentativité) par un facteur d'expansion (qui corrige pour la variabilité journalière du nombre de personnes enquêtées).

Les étapes qui suivent sont nouvelles par rapport à la méthode initiale proposée par Verreault et Morency (2011). Une méthode de calage sur marges est appliquée pour chaque journée afin d'avoir une population de référence présentant les mêmes caractéristiques socio-démographiques que la population initiale. Le calage sur marges est utilisé afin d'éviter le croisement de différents attributs, ce qui conduirait à des strates de population sous-représentées. Les principes méthodologiques de cette méthode sont expliqués entre autres par Sautory (2018). Sommairement, cette technique statistique permet de remplir l'intérieur d'une matrice en respectant les contraintes d'égalité aux marges (fournies par le statisticien). Ici, la méthode exponentielle (ou *raking ratio*) est employée et mise en œuvre dans R grâce au package Icarus (Rebecq, 2016). Trois variables de calage sont utilisées : le sexe, le groupe d'âges et la région du domicile (qui correspond également à la strate spatiale sur laquelle l'enquête de fin de semaine a été pondérée). Finalement, on retrouve la population de référence de départ pour chacune des journées d'enquête ; c'est donc comme si chaque journée devenait une enquête à part entière.

#### 2.4.6 Résultats préliminaires

L'application de la procédure d'expansion décrite précédemment aux données des enquêtes Origine-Destination de 2008 et 2013 permet d'obtenir les courbes de la Figure 10. Ces « courbes enveloppes de la mobilité » représentent le nombre total de déplacements par jour (tous modes confondus) durant les 4 mois d'automne, calculé pour chaque base de données (2008 en rouge et 2013 en vert). Les « trous » dans la courbe associée à l'enquête de 2013 correspondent aux journées de fin de semaine, pour lesquelles aucune donnée n'est disponible. Dans les deux cas, on observe un cycle hebdomadaire plus ou moins régulier qui se répète sur toute la période d'étude, avec quelques pics de déplacements les vendredis du mois de décembre. Ces courbes peuvent également être estimées par mode de transport, puis elles peuvent être comparées aux mêmes courbes obtenues (par agrégation temporelle) avec des données passives. Sans prétraitement préalable, trois modes sont communs entre ces deux sources de données et peuvent donc être directement comparés : le métro, le taxi et les modes actifs. Ainsi, la Figure 11 présente les courbes enveloppes produites pour ces trois modes.

Trois courbes ont été obtenues pour chaque mode de transport analysé à partir de trois bases de données différentes : l'enquête OD 2008, l'enquête OD 2013, et des données passives de l'année 2016 (données cartes à puce de la STM pour le métro, données ouvertes de comptage des Éco-compteurs pour les modes actifs et données transactionnelles de Taxi Diamond pour le taxi). Les validations de cartes à puce permettent d'étudier le total des embarquements dans les 68 stations du réseau de métro montréalais. La carte OPUS ne pouvant être validée qu'une seule fois dans le métro d'après les règles tarifaires de la STM, on peut supposer que chaque validation correspond à un déplacement. Pour le taxi, seules les origines des déplacements à l'intérieur de la zone A11 ont été sélectionnées. De même, pour mesurer l'utilisation des modes actifs, une moyenne de tous les compteurs situés dans l'agglomération A11 a été calculée puis multipliée par 100. Cet indicateur d'intensité agrégé est très simplifié mais, en guise de première analyse, il permet de capturer les fluctuations moyennes de l'usage des modes actifs sur la période d'automne. Encore une fois, les courbes obtenues à partir de l'enquête de 2013 ne sont définies que pour les jours de semaine. De plus, quelques coupures se démarquent dans les courbes car les jours fériés ont

été retirés. Des données manquantes sont également à l'origine de certaines journées omises dans la courbe obtenue à partir des données transactionnelles du taxi.

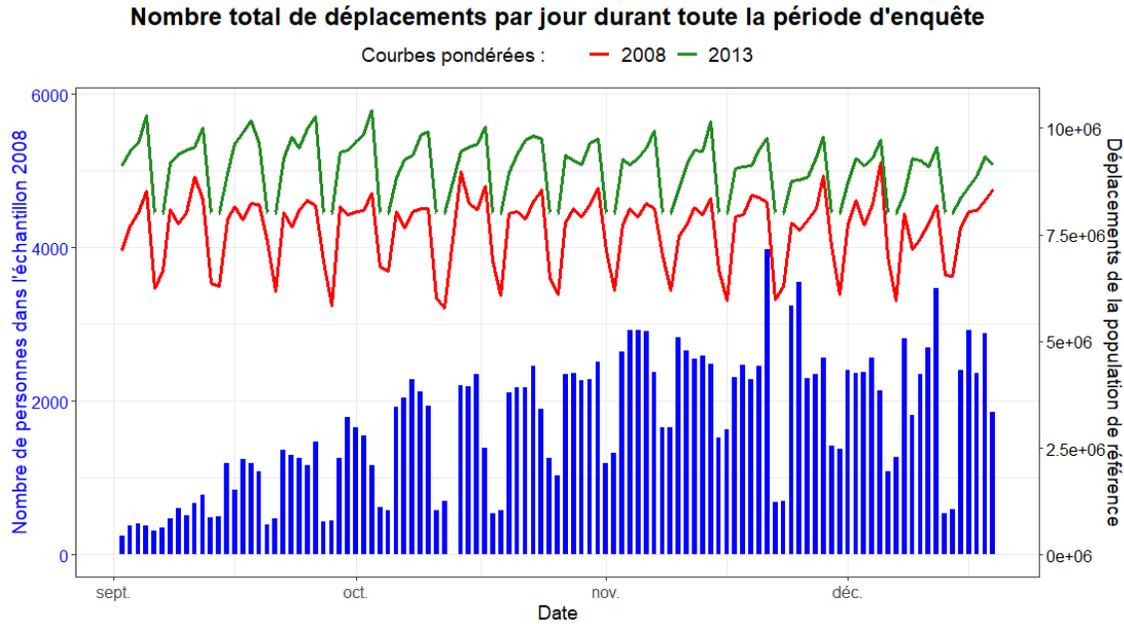


Figure 10. Courbes enveloppes de la mobilité calculées à partir des enquêtes Origine-Destination 2008 et 2013

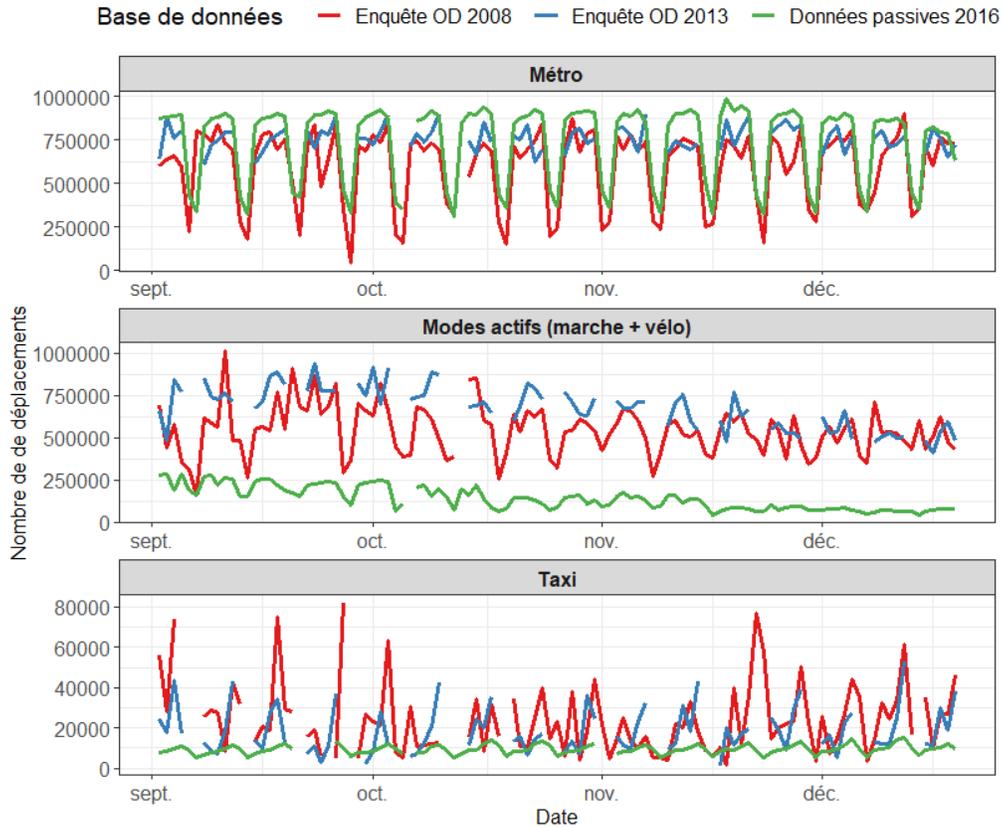


Figure 11. Courbes enveloppes par mode de transport calculées à partir de trois bases de données (enquête OD 2008, enquête OD 2013 et données passives de 2016)

Dans le cas du métro, on observe une certaine régularité dans la courbe des données passives qu'on ne retrouve pas de manière aussi manifeste avec les enquêtes Origine-Destination. Néanmoins, la forme de la semaine reste assez similaire. Les trois bases de données capturent la diminution de l'utilisation des modes actifs à l'approche de l'hiver, déclin qui est probablement lié à la baisse des températures de cette saison. Pour le taxi, des pics d'achalandage sont communs entre les trois bases de données.

Différents types d'indicateurs peuvent être estimés pour comparer ces courbes. Tout d'abord, ces courbes ressemblant à des signaux, une analyse de Fourier peut être menée afin d'étudier leur périodicité. Un périodogramme comme celui de la Figure 12 permet de détecter des fréquences typiques puis d'en déduire des périodes, qu'il est possible de classer en fonction de leur importance spectrale. Par exemple, les périodes mises en évidence dans le cas du métro à partir des courbes de l'enquête OD 2008 et des données de cartes à puce de 2016 (analysées à une granularité plus fine, c'est-à-dire en extrayant le nombre de déplacements à chaque heure de la journée) sont rapportées dans le Tableau 6. Des périodes identiques sont obtenues avec les deux sources de données. Seul leur ordre d'importance diffère : par exemple, les cycles journaliers et hebdomadaires sont plus facilement détectés dans les données passives que dans les données d'enquête. Des périodes typiques de 12h et 8h sont également observées dans les deux cas.

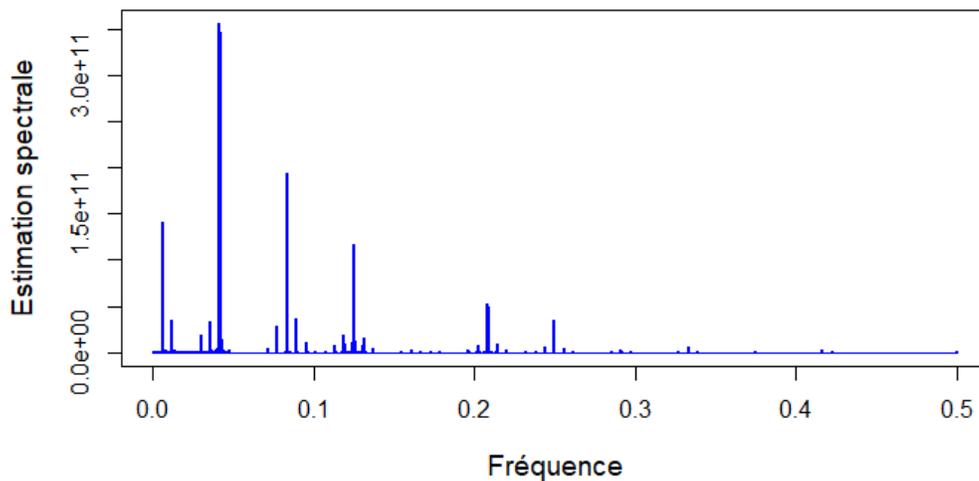


Figure 12. Périodogramme de l'utilisation des 68 stations de métro de Montréal mesurée à partir des données de cartes à puce

Tableau 6. Analyse de saisonnalité avec la transformée de Fourier - Fréquences et périodes détectées pour le métro à partir de deux sources de données

| Enquête OD 2008 (sem + fds) |           |                  |                 | Données de cartes à puce 2016 |           |                  |                 |
|-----------------------------|-----------|------------------|-----------------|-------------------------------|-----------|------------------|-----------------|
| Ordre                       | Fréquence | Période (heures) | Période (jours) | Ordre                         | Fréquence | Période (heures) | Période (jours) |
| 1                           | 0,0833    | 12,00            | 0,500           | 1                             | 0,0415    | 24,11            | 1,004           |
| 2                           | 0,0415    | 24,11            | 1,004           | 2                             | 0,0419    | 23,89            | 0,996           |
| 3                           | 0,0419    | 23,89            | 0,996           | 3                             | 0,0833    | 12,00            | 0,500           |
| 4                           | 0,1248    | 8,01             | 0,334           | 4                             | 0,0059    | 168,75           | 7,031           |
| 5                           | 0,1252    | 7,99             | 0,333           | 5                             | 0,1252    | 7,99             | 0,333           |
| 6                           | 0,0059    | 168,75           | 7,031           | 6                             | 0,1248    | 8,01             | 0,334           |

De plus, des ratios peuvent être calculés entre les courbes des données passives et les courbes des données d'enquête afin de déterminer si ces deux types de données capturent les mêmes fluctuations d'achalandage durant l'automne. Les ratios moyens par type de jour et les coefficients de variations associés sont fournis dans le Tableau 7 pour chaque mode de transport étudié. On constate que les ratios les moins variables sont obtenus dans le cas du métro entre la courbe des données passives de 2016 et celle de l'enquête OD 2013 : les coefficients de variations estimés sont en effet vraiment faibles, inférieurs à 10% pour la plupart. À l'inverse, les ratios obtenus pour le taxi sont très variables, à l'exception de la fin de semaine qui semble donc plus facile à prédire. Pour tous les modes, on remarque que le jeudi est le jour le plus semblable entre les données passives et les enquêtes Origine-Destination.

Tableau 7. Ratios moyens entre les trois courbes enveloppes et coefficients de variation, par type de jour

|              | Ratios    | SEMAINE  |          |          |          |          |          | FIN DE SEM. |          |
|--------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------|----------|
|              |           | lundi    | mardi    | mercredi | jeudi    | vendredi | global   | samedi      | dimanche |
| MÉTRO        | 2016_2008 | 1,26     | 1,27     | 1,28     | 1,28     | 1,15     | 1,25     | 1,54        | 1,87     |
|              |           | 18,2%    | 12,2%    | 16,7%    | 8,9%     | 13,4%    | 14,3%    | 27,8%       | 90,7%    |
|              | 2016_2013 | 1,19     | 1,17     | 1,16     | 1,22     | 1,09     | 1,16     | -           | -        |
|              |           | 9,6%     | 7,6%     | 8,7%     | 8,6%     | 10,7%    | 9,6%     | -           | -        |
|              | 2013_2008 | 1,06     | 1,10     | 1,11     | 1,06     | 1,06     | 1,08     | -           | -        |
|              |           | 20,1%    | 14,0%    | 20,9%    | 13,3%    | 13,7%    | 16,4%    | -           | -        |
| MODES ACTIFS | 2016_2008 | 2,46E-03 | 2,60E-03 | 2,84E-03 | 2,26E-03 | 2,84E-03 | 2,61E-03 | 2,70E-03    | 2,70E-03 |
|              |           | 48,1%    | 44,3%    | 49,5%    | 31,5%    | 62,0%    | 49,1%    | 53,2%       | 83,1%    |
|              | 2016_2013 | 2,14E-03 | 2,41E-03 | 2,39E-03 | 2,05E-03 | 2,11E-03 | 2,22E-03 | -           | -        |
|              |           | 39,6%    | 36,6%    | 48,4%    | 35,8%    | 37,5%    | 39,9%    | -           | -        |
|              | 2013_2008 | 1,17     | 1,06     | 1,19     | 1,12     | 1,28     | 1,17     | -           | -        |
|              |           | 23,3%    | 16,8%    | 18,5%    | 18,4%    | 26,3%    | 21,8%    | -           | -        |
| TAXI         | 2016_2008 | 0,74     | 0,89     | 0,57     | 0,63     | 0,57     | 0,68     | 0,67        | 0,95     |
|              |           | 74,3%    | 174,3%   | 81,5%    | 61,4%    | 117,9%   | 123,5%   | 71,5%       | 59,9%    |
|              | 2016_2013 | 1,49     | 0,89     | 0,84     | 0,50     | 0,49     | 0,80     | -           | -        |
|              |           | 195,2%   | 89,2%    | 54,3%    | 31,7%    | 50,5%    | 152,6%   | -           | -        |
|              | 2013_2008 | 0,86     | 1,51     | 0,77     | 1,27     | 1,54     | 1,20     | -           | -        |
|              |           | 80,4%    | 213,7%   | 61,5%    | 54,3%    | 128,8%   | 148,6%   | -           | -        |

#### 2.4.7 Conclusion

Une procédure d'expansion a été développée afin de rendre les données de l'enquête Origine-Destination comparable à des données passives sur le plan longitudinal. Ces deux sources de données ont alors été comparées à partir du concept de courbe enveloppe. Les indicateurs de comparaison calculés montrent que des similitudes peuvent être trouvées entre les deux sources de données exploitées. Ces similitudes justifient l'application des fluctuations observées dans les données passives sur les données de l'enquête Origine-Destination, principe sur lequel sera basée la dernière étape de ce travail. Dans cette perspective, les recherches en cours visent à proposer une méthode permettant de projeter les indicateurs des enquêtes Origine-Destination en leur appliquant les saisonnalités observées dans les données passives. Il s'agira là d'une première tentative de comblement de la période manquante entre deux enquêtes quinquennales.

## 2.5 Confort à bord des véhicules de transport en commun

- Par : Marc-Antoine Gauthier, maîtrise
- Supervision : Pre Catherine Morency
- Contexte : Chaire Mobilité

### 2.5.1 Introduction

Le confort est un sentiment de bien-être qui varie en fonction des individus. Ce sentiment de bien-être peut être affecté entre autres par la température, par les odeurs et par la densité de personnes autour. À bord des véhicules de transport collectif, le nombre de personnes à bord peut influencer le sentiment de confort des voyageurs ainsi que leurs comportements de mobilité. D'ailleurs, un véhicule bondé amène non seulement des sentiments d'anxiété et de stress aux passagers, mais contribue aussi à augmenter les temps d'arrêt et à une baisse de productivité d'une ligne. Ainsi, prendre en compte le confort dans le choix d'itinéraire des personnes permettrait de prendre en compte la capacité de la ligne, de considérer la perception des usagers par rapport au nombre de personnes à bord et à proposer des itinéraires qui permettent de prendre des lignes moins achalandées.

Somme toute, ce mémoire de maîtrise a pour but de caractériser le confort à bord des véhicules de transport collectif à Montréal, de développer des facteurs multiplicateurs du temps de parcours pour obtenir le temps perçu et d'intégrer les facteurs multiplicateurs dans l'équation du coût généralisé d'un déplacement.

Ce rapport présente l'avancement des travaux sur le confort au cours de la dernière année. Une brève revue de littérature, un diagnostic sommaire du confort à bord des autobus de la STM et une méthodologie d'enquête sur le confort à bord sont présentés.

### 2.5.2 Revue de littérature

Certains irritants peuvent contribuer à réduire le sentiment de bien-être dans les transports collectifs lorsque la charge à bord devient trop élevée. Parmi ceux-ci, il est possible de retrouver des irritants touchant les voyageurs, tels que l'anxiété et le stress. Selon (Cox, Houdmont, & Griffiths, 2006), le manque de contrôle qu'une personne peut avoir sur une situation peut avoir un effet sur le taux de stress. Ensuite, l'arrivée d'événements imprévisibles peuvent augmenter ce sentiment de stress et est corrélé en fonction du temps et de la distance entre le domicile et le travail. Le profil de conduite du véhicule peut aussi avoir un effet sur le sentiment de confort d'un usager à bord des transports collectifs. Des virages serrés, de fortes décélérations peuvent avoir un effet sur le sentiment de confort à bord, surtout lorsque les personnes doivent être debout. (Chin, Pang, & Wang, 2019)

Du point de vue opérateur, l'augmentation de la charge à bord peut se traduire à des temps d'embarquement et de débarquement plus longs. Ce temps peut dépendre de plusieurs facteurs tels que la méthode de paiement, le type et la grandeur du véhicule, la distance inter-arrêt, le débit de circulation et le volume d'embarquements et de débarquements à chaque arrêt. (Zorn, Sall, & Wu, 2012)

Les enquêtes de préférence déclarée sont généralement utilisées pour mesurer les préférences de confort des personnes. Par exemple, dans l'étude de (Björklund & Swärdh, 2017), l'étude du confort présente huit scénarios ayant chacun deux alternatives. Chaque scénario est présenté individuellement, où le répondant doit choisir l'alternative qu'il préfère. Les variables prises en compte dans l'étude sont le tarif, le temps de parcours, la position assise ou debout et le niveau d'entassement. Les répondants ont été approchés à des arrêts de bus, de métro, de tramway et

de train. Les répondants étaient invités à remplir un questionnaire disponible en ligne. Pour l'analyse de données, un modèle logit mixte est utilisé pour obtenir le temps perçu. Les valeurs trouvées varient entre 1.13 et 2.94 dépendant de la situation d'entassement.

### 2.5.3 Diagnostic du confort à bord des autobus de la STM

Il est pertinent de procéder à un diagnostic du confort à bord des différentes lignes d'un réseau de transport collectif afin de déceler les endroits où la demande est très élevée et où les voyageurs pourraient subir de l'inconfort. Pour ce faire, une série d'indicateurs ont été créés afin de caractériser le confort à bord.

#### 2.5.3.1 Liste des indicateurs

Il y a quatre indicateurs déterminés pour caractériser le confort à bord. Il s'agit du ratio de personnes par siège (RPS), le ratio de personnes par place (RPP), la probabilité d'une place assise et la probabilité de refus d'embarquement. Pour le calcul de ces indicateurs, le nombre moyen de transactions effectuées avec une carte à puce sur chaque ligne et chaque heure pour le mois de septembre 2017 est considéré et ces données sont imputées à l'aide des montants et descendants de l'Enquête Origine-Destination 2013. Les données GTFS sont par la suite utilisées pour assigner à chaque arrêt le nombre de montants et de descendants à chaque passage ainsi que la charge à bord sur chaque tronçon.

#### Ratio de personnes par siège et le ratio de personnes par place

Le ratio de personnes par siège (RPS) permet de déterminer le nombre de personnes dans un véhicule en fonction du nombre de sièges disponibles. Celui-ci est calculé à partir de la charge obtenue à chaque arrêt sur le réseau à partir de la demande et de la capacité en places assises pour chaque véhicule. Il est considéré que personne n'est debout tant qu'une place assise est disponible. Lorsque le ratio est inférieur à 1, il implique des places assises sont encore disponibles pour la clientèle.

Le ratio de personnes par place (RPP) permet de déterminer le nombre de personnes dans un véhicule en fonction du nombre de places assises et debout disponibles. Celui-ci est calculé à partir de la charge à bord à chaque arrêt à partir de la demande et de la capacité en places assises pour chaque véhicule. Il est considéré que personne n'est debout tant qu'une place assise est disponible et les personnes sont également distribuées dans les voitures de métro et de train. Le ratio devrait être en tout temps inférieur à 1, vu qu'il n'est pas possible d'avoir une charge supérieure à la capacité. De plus, lorsque le ratio est équivalent à 1, il est supposé que personne ne peut entrer dans le véhicule.

Il est possible de calculer le RPS et le RPP moyen pour l'ensemble d'une ligne. Pour ce faire, il implique de calculer la distance entre chaque tronçon de ligne. Le tronçon d'une ligne correspond à la distance entre deux arrêts. Par la suite, le RPS et le RPP sont calculés pour le tronçon en considérant le nombre d'embarquements et de débarquements au premier arrêt sur le tronçon. Finalement, le RPS et le RPP moyen sont calculés en prenant en compte la pondération par la distance :

$$\text{Taux d'occupation ligne} = \frac{\sum_{i=1}^n RPP \text{ ou } RPS_i * \text{Distance}_i}{\sum_{i=1}^n \text{Distance}_i}$$

### Probabilité d'une place assise et probabilité du refus d'embarquement

La probabilité d'une place assise consiste à déterminer, à partir de la charge moyenne à bord pour une période de la journée donnée, la probabilité qu'un usager puisse avoir accès à une place assise en fonction de l'arrêt emprunté. Pour ce faire, il est supposé que la fonction de probabilité d'une place assise suive une loi de Poisson dont l'espérance correspond à la charge moyenne calculée à bord pour la période d'enquête donnée. La probabilité d'une place assise correspond à calculer la probabilité que la charge soit inférieure à la capacité en places assises du véhicule. La fonction de probabilité est détaillée ci-dessous.

$$P(X < C) \sim \text{Poisson}(\gamma = V)$$

Où X correspond au nombre de passagers à bord à un arrêt donné, C correspond à la capacité en places assises du véhicule, V correspond à la charge moyenne à l'arrêt donné.

Lorsque la charge à bord approche la capacité, les usagers ne peuvent pas prendre place lorsque le véhicule arrive à l'arrêt. Il implique qu'ils doivent attendre un intervalle supplémentaire et embarquer au prochain passage du véhicule. Il est possible de déterminer les arrêts pour lesquels la probabilité du refus d'embarquement est la plus élevée. Pour calculer cette probabilité, il est supposé que la charge à bord suive une loi de Poisson, détaillée à ci-dessous.

$$P(X > C) \sim \text{Poisson}(\gamma = V)$$

Où X correspond au nombre de passagers à bord à un arrêt donné, C correspond à la capacité du véhicule, V correspond à la charge moyenne à l'arrêt donné.

Cette probabilité se calcule pour un arrêt donné.

De plus, il est possible de calculer la probabilité d'une place assise ou du refus d'embarquement pour l'ensemble d'une ligne empruntée. La méthodologie de calcul ressemble à celle employée pour calculer le taux d'utilisation moyen de la capacité. Tout d'abord, chaque tronçon emprunté par la ligne est déterminé et la probabilité d'avoir une place assise est déterminée pour chaque tronçon. Une fois la probabilité calculée pour chaque tronçon, il est possible de calculer la probabilité moyenne d'accéder à une place assise sur toute une ligne en faisant la pondération entre la probabilité à un tronçon et la distance parcourue, comme illustrée ci-dessous.

$$\text{Probabilité place assise itinéraire} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Probabilité}_i * \text{Distance}_i}{\sum_{i=1}^n \text{Distance}_i}$$

Lorsque vient le temps de faire la comparaison entre les différentes lignes, il est possible de déterminer les lignes où les places assises ont une probabilité plus faible.

#### 2.5.3.2 Résultats préliminaires

Afin d'illustrer certains résultats, l'exercice a été fait sur le réseau d'autobus de la Société de Transport de Montréal (STM). Il a été possible de faire ressortir certains constats sur l'état du confort à bord des autobus.

La probabilité d'une place assise en période de pointe est présentée à la Figure 13.

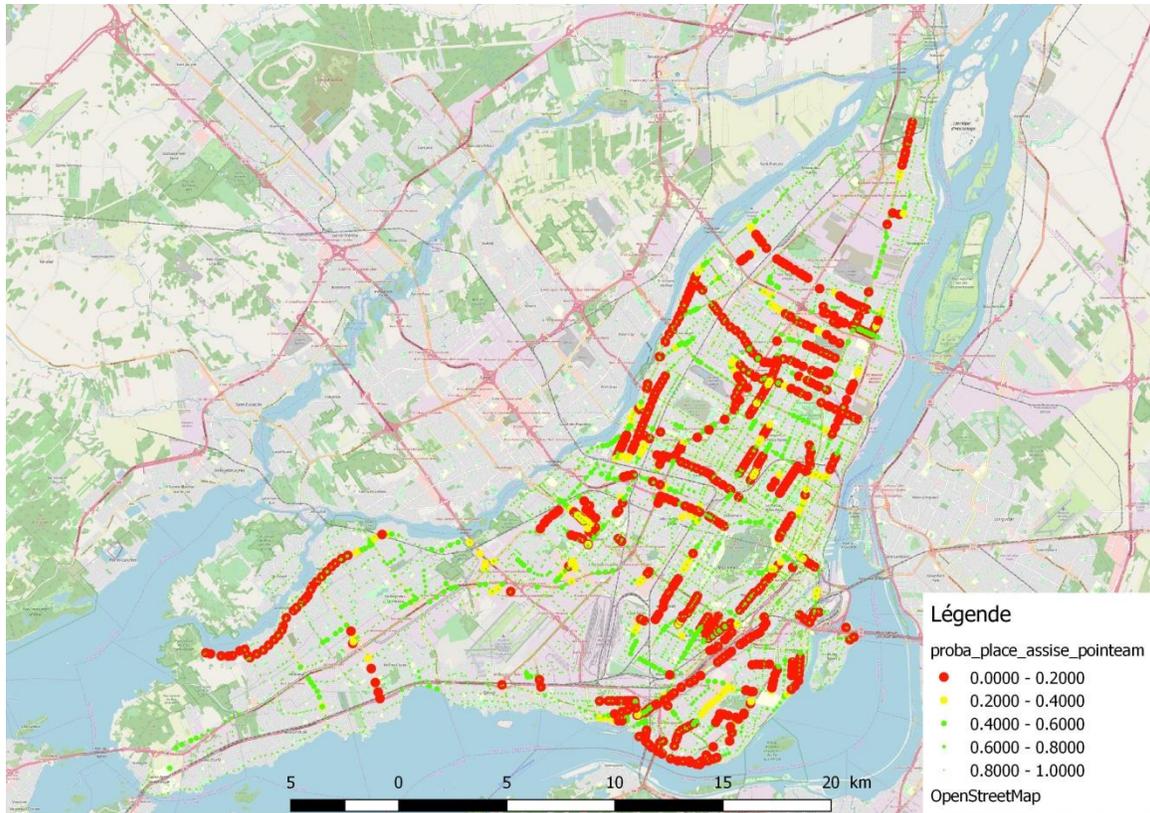


Figure 13. Probabilité d'une place assise pour la période de pointe du matin

Il est possible de remarquer que la probabilité d'une place assise est compromise en période de pointe. En effet, le nombre de personnes voulant se déplacer en période de pointe est plus élevé qu'en période hors-pointe, faisant que la probabilité d'une place assise diminue pour l'ensemble des arrêts. Cependant, cette probabilité semble surtout affecter les arrêts qui se situent sur de grands axes, tels que le Boulevard Gouin dans l'ouest, le Boulevard Lasalle, le boulevard Henri-Bourassa et la rue Sherbrooke sur certains tronçons. Il est aussi possible de remarquer que la probabilité d'avoir une place assise diminue à mesure que le bus s'approche d'une station de métro, et la probabilité se remet à augmenter par la suite, impliquant que plusieurs personnes sont descendues après la station de métro.

#### 2.5.4 Enquête sur les préférences de confort

Le corps principal de ce mémoire de maîtrise consiste à monter une enquête de préférence déclarée ayant pour but de déterminer les préférences de confort des usagers des transports collectifs. L'enquête est divisée en quatre sections, soit l'enquête sur le déplacement le plus fréquent, l'enquête sur la préférence de différentes alternatives, l'enquête sur le confort à bord et les attributs socio-démographiques.

En premier lieu, le répondant est invité à donner son déplacement le plus fréquent à l'exception du retour au domicile. Le but est de pouvoir caractériser le motif, son lieu de départ, son lieu d'arrivée ainsi que l'ensemble des modes utilisés pour effectuer le déplacement. Il sera invité par la suite de comparer cet itinéraire avec d'autres itinéraires possibles, tels que le chemin le plus court.

En deuxième lieu, à partir de l’itinéraire le plus fréquent déclaré par le répondant, il est possible de proposer le répondant une série d’alternatives à son itinéraire. Les itinéraires sont générés à partir du chemin le plus court et certains segments sont permutés pour changer soit la ligne ou le mode de transport. Un exemple d’alternatives est présenté à la Figure 14.

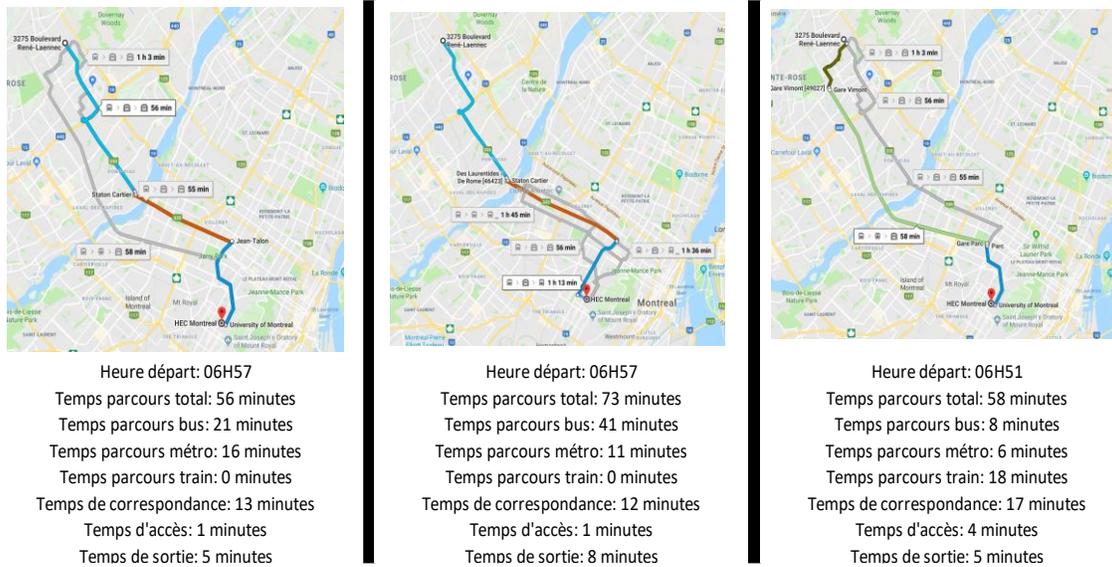


Figure 14. Exemple d’alternatives pour un déplacement déclaré par un répondant

Le but de cette section est de déterminer les éléments qui peuvent avoir une influence sur le choix d’itinéraire d’une personne. Le répondant sera invité à classer les alternatives en fonction de celles qu’il préfère et sera invité à justifier ses choix afin de connaître les préférences qui peuvent influencer son choix d’itinéraire.

En troisième lieu, le répondant est invité à donner ses préférences de confort en prenant en compte le temps de parcours, le véhicule et le niveau de confort. Il s’agit de la partie la plus importante du questionnaire et cette section servira à déterminer les facteurs multiplicateurs du temps de parcours pour obtenir le temps perçu. Il s’agit de présenter à l’usager plusieurs scénarios de deux alternatives. À chaque alternative, l’usager sera invité à sélectionner l’itinéraire qu’il ferait s’il avait à choisir. Un exemple de scénario est présenté à la Figure 15.

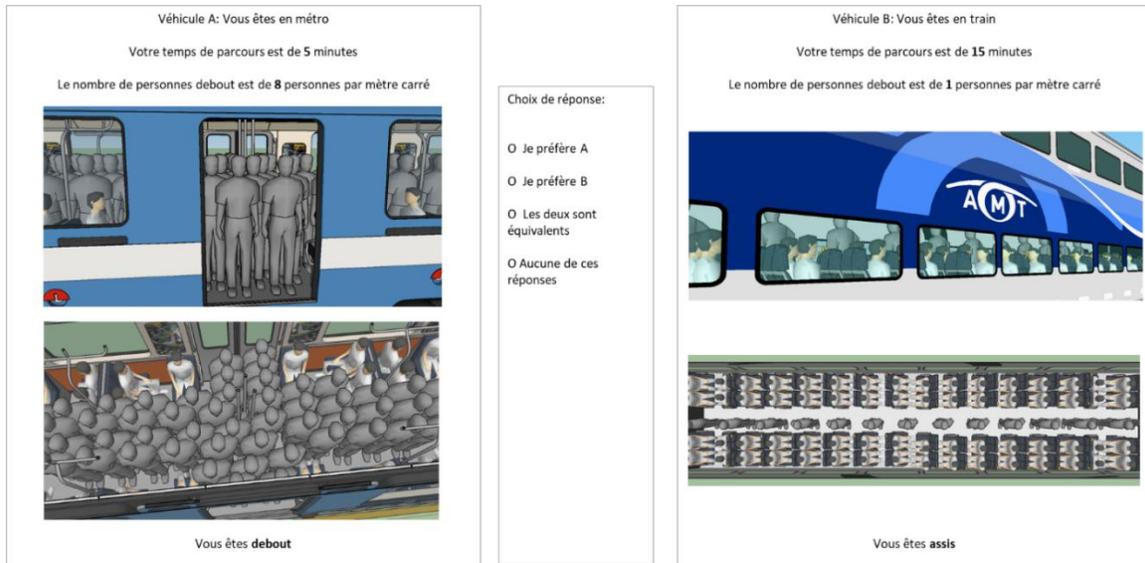


Figure 15. Exemple de scénario de l'enquête sur le confort à bord

Les variables choisies sont le temps de parcours, l'entassement, le véhicule et la position assise ou debout. Quatre variables ont été choisies parce que le but était de garder le questionnaire le plus simple possible pour le répondant et parce que l'augmentation du nombre de variables vient augmenter le nombre de scénarios à tester. En augmentant le nombre de scénarios à tester, il implique que les répondants auraient été confrontés à un nombre énorme de scénarios et un biais statistique aurait pu être induit par une fatigue de répondre de la part des répondants.

#### 2.5.4.1 Génération des scénarios

Pour développer les scénarios, un modèle fractionnel factoriel est utilisé. (Kocur, Adler, Hyman, & Aunet, 1982) Il consiste à déterminer, pour une liste de variables données qui ont chacun un nombre de niveaux donnés, le nombre de scénarios et les combinaisons à présenter au répondant pour avoir des résultats représentatifs. En utilisant ce modèle, il est supposé que les variables n'aient pas d'interaction entre elles.

Le première série d'alternatives est généré à partir du modèle fractionnel factoriel. Pour générer la deuxième série d'alternatives à tester avec la première, il est possible d'utiliser une méthode d'incrémation. La méthode consiste à incrémenter les variables de chaque colonne d'une valeur 1 pour générer la deuxième série d'alternatives. Cependant, pour les besoins de l'exercice, il est proposé d'incrémenter et de jumeler les alternatives de façon à avoir la majorité du temps un scénario debout et un scénario assis où le temps de parcours est plus élevé. Le but de cette manœuvre est de pouvoir mesurer le coût associé à une place assise.

#### 2.5.4.2 Détermination des niveaux de chaque variable

Il y a quatre variables pour les scénarios, soit le temps de parcours, le véhicule, l'entassement et la position assise ou debout. Ces variables comprennent chacune trois niveaux, à l'exception de la position assise ou debout qui n'en contient que deux.

Pour la variable du véhicule, les trois principaux modes de transport de la région de Montréal sont considérés, soit le train, l'autobus et le métro. Cette variable est prise en compte, car le but est de voir si un véhicule en particulier est préféré pour son confort. De plus, pour certains modes, tels que le métro et le train, le réseau n'est pas assez développé de façon à avoir plusieurs alternatives de ces modes à partir d'un lieu d'origine et de destination donné. Ainsi, il peut être pertinent de se demander si les gens ne seraient pas prêts à faire leur déplacement à bord d'un

bus dans le cas où la situation d'entassement vécue dans le train ou le métro serait au-delà de la tolérance de l'utilisateur.

Pour la variable de l'entassement, celle-ci est générée en considérant que les places assises sont toujours prises dans tous les scénarios, afin de ne pas avoir de biais associé à une personne qui resterait debout par choix. De plus, dans le développement des facteurs multiplicateurs, il est considéré que l'utilisateur ne percevra pas le temps plus long s'il a accès à une place assise. Cela permet de poser dans les questionnaires qu'il y aura toujours un certain entassement dans le véhicule lorsque l'utilisateur voyage. Les valeurs sont déterminées en fonction de la densité de personnes par mètre carré. Il est supposé qu'un humain moyen mesure 0,465 mètre de largeur par 0,254 mètre de profondeur, donnant une surface approximative de 0,116 m<sup>2</sup>. (First in Architecture, 2019) La première valeur d'entassement correspond à environ une personne par mètre carré. L'entassement maximal correspond à la quantité maximale d'humains pouvant être contenus dans un mètre carré, soit huit personnes. Finalement, l'entassement moyen correspond à la moyenne des deux valeurs, soit quatre personnes par mètre carré.

Pour la variable de position assise ou debout, le but est de déterminer si l'utilisateur va accorder une importance à avoir une place assise et si oui, quel sera le temps supplémentaire qu'il sera prêt à prendre pour faire son déplacement.

Pour la variable du temps de parcours, ceux-ci sont déterminés à partir de l'échantillon de l'enquête Origine-Destination. En étudiant chaque segment emprunté par tous les usagers sondés qui prennent les transports collectifs, il est possible de déduire les temps de parcours minimaux, moyens et maximaux. Dans l'enquête, le temps de parcours minimal correspond au centile 25 de l'ensemble des temps de parcours pour un mode donné, le temps de parcours moyen correspond au centile 50 et le temps de parcours maximal correspond au centile 75. La distribution des temps de parcours pour chaque mode sont présentés dans le Tableau 8.

Tableau 8. Temps de parcours minimal, moyen et maximal en fonction du mode

| Mode    | Temps de parcours |       |         |
|---------|-------------------|-------|---------|
|         | Minimal           | Moyen | Maximal |
| Train   | 15                | 25    | 35      |
| Autobus | 10                | 15    | 20      |
| Métro   | 5                 | 10    | 15      |

Ces valeurs de temps de parcours sont donc utilisées en fonction du véhicule et permettent de générer l'ensemble des alternatives.

#### 2.5.4.3 Regroupement des scénarios ensemble

Une fois toutes les variables et les niveaux déterminés, il est maintenant possible de faire le jumelage des alternatives et de créer l'ensemble des scénarios. Les deux scénarios comparatifs sont groupés ensemble de façon à avoir un premier scénario où la personne est debout et un deuxième scénario où la personne est assise, mais que son temps de parcours est plus élevé. Pour certains scénarios, il n'a pas été possible de procéder de cette façon, faisant que certains scénarios servent de variables de contrôle afin de monitorer si le répondant répond correctement aux questions ou s'il se dépêchait à répondre. En somme, les alternatives générées sont présentées au Tableau 9.

Tableau 9. Liste des scénarios à tester pour chaque mode de transport pour le confort à bord

| Scénario | Véhicule | Tmps Parcou | Entassement | Position | Véhicule | Tmps Parcou | Entassement | Position |
|----------|----------|-------------|-------------|----------|----------|-------------|-------------|----------|
| 1        | Bus      | 10          | 1           | Debout   | Métro    | 15          | 4           | Assis    |
| 2        | Bus      | 10          | 4           | Debout   | Métro    | 15          | 8           | Assis    |
| 3        | Bus      | 10          | 8           | Assis    | Métro    | 5           | 1           | Debout   |
| 4        | Bus      | 15          | 1           | Debout   | Métro    | 10          | 4           | Debout   |
| 5        | Bus      | 15          | 4           | Assis    | Métro    | 10          | 8           | Debout   |
| 6        | Bus      | 15          | 8           | Debout   | Métro    | 5           | 1           | Debout   |
| 7        | Bus      | 20          | 1           | Assis    | Métro    | 15          | 4           | Debout   |
| 8        | Bus      | 20          | 4           | Debout   | Métro    | 5           | 8           | Assis    |
| 9        | Bus      | 20          | 8           | Debout   | Métro    | 10          | 1           | Assis    |
| 10       | Métro    | 5           | 1           | Assis    | Train    | 15          | 4           | Debout   |
| 11       | Métro    | 5           | 4           | Debout   | Train    | 25          | 8           | Assis    |
| 12       | Métro    | 5           | 8           | Debout   | Train    | 15          | 1           | Assis    |
| 13       | Métro    | 10          | 1           | Debout   | Train    | 25          | 4           | Assis    |
| 14       | Métro    | 10          | 4           | Debout   | Train    | 25          | 8           | Assis    |
| 15       | Métro    | 10          | 8           | Assis    | Train    | 15          | 1           | Debout   |
| 16       | Métro    | 15          | 1           | Debout   | Train    | 35          | 4           | Assis    |
| 17       | Métro    | 15          | 4           | Assis    | Train    | 15          | 8           | Debout   |
| 18       | Métro    | 15          | 8           | Debout   | Train    | 35          | 1           | Assis    |
| 19       | Train    | 15          | 1           | Debout   | Bus      | 20          | 4           | Assis    |
| 20       | Train    | 15          | 4           | Assis    | Bus      | 10          | 8           | Debout   |
| 21       | Train    | 15          | 8           | Debout   | Bus      | 20          | 1           | Assis    |
| 22       | Train    | 25          | 1           | Assis    | Bus      | 15          | 4           | Debout   |
| 23       | Train    | 25          | 4           | Debout   | Bus      | 15          | 8           | Debout   |
| 24       | Train    | 25          | 8           | Debout   | Bus      | 15          | 1           | Debout   |
| 25       | Train    | 35          | 1           | Debout   | Bus      | 10          | 4           | Debout   |
| 26       | Train    | 35          | 4           | Debout   | Bus      | 20          | 8           | Debout   |
| 27       | Train    | 35          | 8           | Assis    | Bus      | 20          | 1           | Debout   |

Tester 27 alternatives différentes pour un répondant peut être fatigant pour celui-ci. Lors des fatigues des répondants, ceux-ci peuvent arrêter de répondre avec sérieux, ce qui compromet par la suite les résultats escomptés. Pour avoir des résultats fiables, il implique de réduire le nombre de questions tout en gardant les 27 alternatives à poser. Pour ce faire, il est proposé de poser les questions avec une méthode par blocs. Les blocs sont attribués de façon aléatoire au répondant de façon à avoir le même taux de réponse pour chaque bloc. Les blocs sont créés de façon à avoir un moins un ensemble comprenant chaque mode, c'est-à-dire au moins une question du mode bus vers métro, du mode métro vers bus, du mode bus vers train, du mode train vers bus, du mode métro vers train et du mode train vers métro. Les blocs sont présentés dans le Tableau 10.

Tableau 10. Liste des scénarios utilisés pour chaque bloc de questions

| Id Bloc | Id du scénario |   |   |    |    |    |    |    |    |
|---------|----------------|---|---|----|----|----|----|----|----|
|         | 1              | 3 | 8 | 10 | 11 | 18 | 19 | 20 | 26 |
| 1       | 2              | 5 | 6 | 13 | 14 | 15 | 21 | 22 | 24 |
| 3       | 4              | 7 | 9 | 12 | 16 | 17 | 23 | 25 | 27 |

Les scénarios sont d'abord attribués aux blocs par ordre séquentiel. Par la suite, les alternatives restantes sont distribuées de façon à avoir un nombre équitable de chaque alternative dans

chaque bloc. Cela implique qu'une personne peut avoir plus de questions sur le transfert du mode bus vers métro, mais va avoir moins de questions sur le transfert du mode train vers bus par exemple. Vu que chaque mode comprend neuf questions, il était clair à l'avance que le nombre de scénarios pour chaque mode ne serait pas le même pour chaque bloc.

Ces blocs seront présentés aux différents répondants de façon aléatoire, et le nombre élevé de questionnaire remplis devrait amener à avoir un nombre égal de questionnaires remplis pour chaque bloc. Dans le cas d'un nombre non égal de questionnaires remplis pour chaque bloc, il s'agira soit d'éliminer certains questionnaires afin d'avoir un nombre de questionnaires remplis égal pour chaque bloc, ou d'attendre pour avoir un nombre égal de questionnaires pour chaque bloc. Vu que les différents scénarios devraient tous être remplis par la même personne, il implique donc que chaque bloc doit pouvoir avoir le même nombre de questionnaires valides afin de ne pas biaiser les résultats par la suite.

#### *2.5.4.4 Attributs socio-démographiques*

Afin de pouvoir mesurer la variabilité des résultats en fonction des différentes strates de population, il est demandé aux répondants de répondre à certaines questions socio-démographiques afin de les classer. Ces questions comprennent le sexe, l'âge, le revenu du foyer, l'occupation et la présence d'une limitation physique. En regardant la littérature, les femmes seraient plus soucieuses du confort que les hommes pour des questions de sécurité, les plus jeunes seraient prêts à vivre des situations d'entassement plus élevées que les personnes plus âgées, les gens plus aisés chercheraient davantage de confort. En questionnant les répondants sur ces attributs, il sera par la suite possible de segmenter les résultats en fonction de chaque strate de la population et de pouvoir voir si les hypothèses suivantes sont confirmées.

#### *2.5.5 Conclusion*

Au cours des prochains mois, il sera question de procéder à l'acquisition de données par la réalisation d'une enquête pilote auprès d'un échantillon ciblé de personnes prenant les transports collectifs. Cet échantillon, estimé à environ 500 personnes, permettra de construire un premier modèle permettant de générer des multiplicateurs du temps de parcours pour obtenir le temps perçu. Un modèle logit sera utilisé afin de générer ces facteurs multiplicateurs. Il est attendu que les usagers risquent de trouver plus confortable le train que le métro et le métro plus confortable que le bus. Ensuite, il est attendu que les répondants auront une certaine sensibilité pour le temps de fonction en fonction de la distance qu'ils ont à parcourir. Ainsi, plus la distance sera élevée, plus les gens seront enclins à augmenter leur niveau de confort.

Somme toute, le confort reste un sujet très subjectif, car chacun a sa propre perception du confort. Grâce à cette enquête, il sera potentiellement possible de mieux adapter le service de façon à mieux répondre aux besoins en confort de la clientèle tout en gardant en tête les objectifs opérationnels des opérateurs.

## 2.6 Méthodologie de développement de cycles de conduite

- Par : Frédérique Roy, stagiaire de recherche
- Supervision : Pre Catherine Morency
- Contexte : Chaire Mobilité / Chaire en transformation du transport

### 2.6.1 Introduction

Le réchauffement climatique est devenu un enjeu mondial et ses impacts sont bien connus : élévation du niveau de la mer, augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes, extinction de masse, etc. Vu l'urgence de s'attaquer à ce problème, il est nécessaire de promouvoir les mesures les moins coûteuses à implémenter tout en ayant le plus grand impact. Au Québec, 43% des émissions GES viennent du secteur des transports (Ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques, 2019). Les mesures de réduction des GES qui ciblent ce secteur ont par conséquent le potentiel d'avoir un impact particulièrement significatif. Afin de mesurer avec précision ces impacts, il est nécessaire de développer des outils permettant de mesurer les émissions de GES des véhicules motorisés, tel que les cycles de conduite.

Les cycles de conduite représentent les comportements de conduite via un profil de vitesse dans le temps, et ils sont un élément clé permettant la modélisation précise des émissions. L'objectif de cette étude est d'évaluer la sensibilité des cycles de conduite à certaines variations dans leur processus de construction, en portant une attention particulière à la façon de définir les micro-segments et aux méthodes de partitionnement de données, afin d'identifier la meilleure méthode de construction.

L'article est structuré comme suit. Tout d'abord, une synthèse des pratiques de développement des cycles de conduite est fournie, suivie par la présentation des méthodes sélectionnées pour développer les cycles de conduite. La section suivante détaille la méthodologie utilisée pour comparer les cycles de conduite générés par les différentes méthodes. La performance de ces méthodes est ensuite présentée et discutée. Les contributions, les limitations et les perspectives concluent l'article.

### 2.6.1 Revue de littérature

Comme mentionné précédemment, il est important de mesurer l'impact de diverses stratégies en matière de transport sur les émissions de GES. Parmi ces mesures, certaines sont axées sur les opérations du transport en commun. En 2018, la Ville de Montréal disposait de 394 km de mesures préférentielles (STM, 2018) accessibles aux autobus, taxis et parfois au covoiturage aux heures de pointe, ce qui représente un gain de 330 km depuis 2008 (STM, 2017). Ces types de mesures ont l'avantage de réduire les temps de trajet et d'assurer la fiabilité du service, ce qui le rend plus attractif pour les utilisateurs et augmente son taux d'utilisation (Mundy et al., 2017). Par exemple, l'initiative « Dublin Quality Bus Corridor (QBC) » mise en œuvre en 1997 a entraîné une augmentation de l'achalandage des utilisateurs de 61% (Mundy et al., 2017). En plus de la réduction de GES due au transfert modal, les mesures préférentielles comme les voies réservées, les voies de contournement de file d'attente ou les feux de circulation prioritaires pour autobus ont un impact plus direct. En effet, parce qu'un autobus est moins susceptible de rester bloqué dans le trafic, sa vitesse est plus régulière. Ainsi, il consomme moins de carburant et il émet moins de GES (Karekla et al., 2018).

La quantification des avantages de ces mesures, à savoir la réduction des émissions de GES, est primordiale pour obtenir l'appui public et politique (Mundy et al., 2017). Pour se faire, un système

de modélisation des émissions précis et fiable est nécessaire. MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator) est le principal système de modélisation des émissions utilisé en Amérique du Nord (Nouri, 2015). MOVES repose en grande partie sur les cycles de conduite, qui sont une représentation des comportements de conduite via les variations de vitesse et d'accélération dans le temps. Les cycles de conduite caractérisent les styles de conduite dans diverses conditions et permettent d'estimer la consommation de carburant et les émissions réelles. Des cycles de conduite qui représentent correctement les comportements de conduite et qui sont spécifiques à la topographie du réseau routier et aux conditions de circulation de chaque zone sont nécessaires pour garantir la validité des résultats de MOVES.

La méthode la plus courante pour construire des cycles de conduite s'articule autour de six principales étapes: la collecte de données, la génération de micro-segments, la classification des micro-segments, la sélection des critères d'évaluation de performance, le développement des cycles de conduite et la sélection du cycle le plus représentatif. Les étapes sont détaillées ci-dessous.

#### 2.6.1.1 Collecte de données

Des données en quantité suffisante et représentatives de la région étudiée sont essentielles et souvent une des principales limitations dans la construction des cycles de conduite. La collecte de données doit être répartie dans l'espace et le temps, pour un jour donné et tout au long de l'année, afin de capturer correctement les variations des modes de conduite.

#### 2.6.1.2 Génération des micro-segments

Après le prétraitement des données, les déplacements doivent être divisées en segments plus petits appelés micro-segments. Les micro-segments sont les briques utilisées pour construire les cycles de conduite, c'est-à-dire de petites sections de profil de vitesse en fonction du temps. La définition des micro-segments la plus utilisée est la séquence entre deux arrêts successifs (Xiao et al., 2012). Cette définition a été utilisée entre autres dans des études récentes menées par (Koossalapeerom et al. 2019, Zhao et al. 2018 et Peng et al., 2019). Une autre définition courante est basée sur des intervalles de vitesse et d'accélération. Elle consiste à diviser les micro-segments selon différents modes de conduite comme le mode accélération, le mode décélération, le mode inactif (*idle mode*), le mode croisière (*cruising mode*) et le mode rampant (*creeping mode*). Cette définition de micro-segments a été utilisée entre autres dans des études récentes menées par Wang et al. (2019) et Ma et al. (2019). Nouri et Morency (2017) ont étudié et comparé la performance de 8 définitions de micro-segments, notamment la séquence entre deux arrêts, les intervalles de vitesse et la division en distances fixes. La segmentation en micro-segments de distance fixe implique de diviser les données en segments d'égale distance. Leurs résultats ont montré que les micro-segments de distance fixe permettent de créer les cycles de conduite les plus précis, en particulier ceux de 250 mètres.

#### 2.6.1.3 Classification des micro-segments

Généralement, le développement des cycles de conduite se poursuit en classant les micro-segments dans des groupes, rassemblant ainsi les micro-segments aux caractéristiques communes. Plusieurs algorithmes de classification et plusieurs paramètres permettant de caractériser les micro-segments sont proposés dans la littérature. La classification en plages de vitesse est utilisée dans différentes études telles que Koossalapeerom et al. (2019) et Wang et al. (2019). Cette méthode implique la distribution des micro-segments en fonction de leur vitesse moyenne dans des intervalles de vitesse prédéfinis. D'autres études ont préféré classer les micro-segments en utilisant des algorithmes de partitionnement de données comme l'algorithme des k-moyennes et celui des k-médoïdes, combinés avec différentes mesures de distance. Fotouhi

et Montazeri-Gh (2013) ont décidé de classer les micro-segments en fonction de la corrélation entre leur vitesse moyenne et leur temps d'inactivité divisé par la durée totale du micro-segments, combinée à l'algorithme des k-moyennes. Ma et al. (2019) ont préféré utiliser l'algorithme des k-moyennes tout en caractérisant les micro-segments selon leur vitesse moyenne. Andre (2004) a choisi de catégoriser les micro-segments en utilisant la distance chi carré sur la distribution des fréquences temporelles de vitesse et d'accélération, de l'anglais Speed Acceleration time Frequency Distribution (SAFD). Dans d'autres études, une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée sur 15 paramètres liés aux proportions de vitesse, d'accélération et de modes de conduite, permettant ainsi de mieux caractériser les micro-segments. Ainsi, Yuhui et al. (2017) et Peng et al. (2019) ont ensuite mesuré la distance entre les micro-segments dans leurs nouvelles trois ou quatre dimensions et ils ont utilisé l'algorithme des k-moyennes.

#### *2.6.1.4 Sélection des critères d'évaluation de performance*

Pour mesurer la validité et la qualité des cycles de conduite, des mesures d'évaluation doivent être identifiées. Les critères sont généralement liés à la vitesse et à l'accélération, comme la vitesse moyenne, l'accélération quadratique moyenne ou la proportion de différents modes de conduite (Nouri et Morency, 2017). Les critères d'évaluation de performance sont calculés pour l'ensemble de la base de données et les résultats quantifient les caractéristiques vers lesquelles le cycle de conduite devrait tendre afin de représenter correctement les comportements de conduite.

#### *2.6.1.5 Développement des cycles de conduite*

Une fois que les micro-segments sont rassemblés en groupes selon leurs caractéristiques, ils sont concaténés en utilisant un processus de Markov jusqu'à ce que la durée de cycle souhaitée soit atteinte. La durée du cycle de conduite varie normalement entre 20 minutes (Zhao et al. 2018, Peng et al. 2019, André 2004) et 46 minutes (Karekla et al. 2018).

#### *2.6.1.6 Sélection du cycle de conduite*

Après avoir généré plusieurs cycles de conduite potentiels, leurs caractéristiques sont comparées aux caractéristiques de la base de données entière. Leurs performances sont classées selon les mesures d'évaluation choisies et le meilleur est sélectionné. Comme le soulignent Nouri et Morency (2017), les méthodes de génération et de classification des micro-segments sont les deux étapes pour lesquelles il n'y a pour l'instant pas de véritable consensus dans la littérature.

### 2.6.2 Méthodologie

Au total, 15 méthodes de construction de cycles de conduite ont été comparées en évaluant leur écart avec les critères d'évaluation calculés pour l'ensemble de la base de données. La Figure 16 résume les différentes étapes et variations des méthodes de construction de cycles de conduite. Les différentes approches de segmentation des micro-segments, les algorithmes de partitionnement de données et les descriptions de micro-segments peuvent être combinés en 15 méthodes, présentées dans le Tableau 11. Les six principales étapes de construction des cycles de conduite ont été suivies pour chaque méthode afin de sélectionner la plus appropriée. Le code a été écrit en python, mais la bibliothèque rpy2 a été utilisée pour accéder à certaines fonctions de R.

Tableau 11. Méthodes de création des cycles de conduite

| Numero de la méthode | Segmentation des micro-segments | Algorithme de partitionnement de données | Description des micro-segments |
|----------------------|---------------------------------|--|--------------------------------|
| 1                    | D250                            | PAM                                      | PCA                            |
| 2                    | D250                            | PAM                                      | v_idle                         |
| 3                    | D250                            | kmeans                                   | PCA                            |
| 4                    | D250                            | kmeans                                   | v_idle                         |
| 5                    | D250                            |  | V-range                        |
| 6                    | S0                              | PAM                                      | PCA                            |
| 7                    | S0                              | PAM                                      | v_idle                         |
| 8                    | S0                              | kmeans                                   | PCA                            |
| 9                    | S0                              | kmeans                                   | v_idle                         |
| 10                   | S0                              |  | V-range                        |
| 11                   | DM                              | PAM                                      | PCA                            |
| 12                   | DM                              | PAM                                      | v_idle                         |
| 13                   | DM                              | kmeans                                   | PCA                            |
| 14                   | DM                              | kmeans                                   | v_idle                         |
| 15                   | DM                              |  | V-range                        |

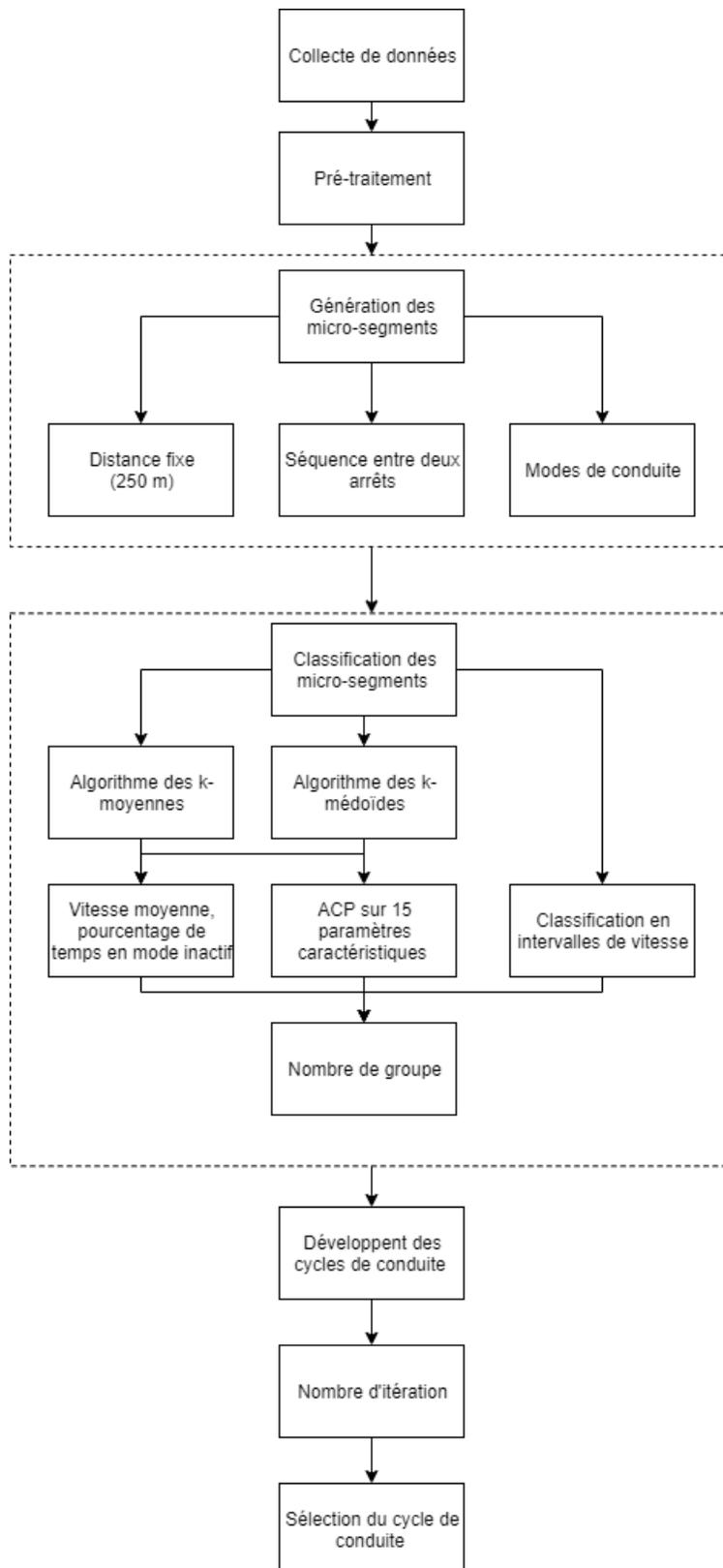


Figure 16. Variations dans les processus de développement des cycles de conduite

### 2.6.2.1 Collecte de données

Des données GPS d'autobus ont été fournies par la Société de Transport de Montréal (STM). Elles couvrent 5 jours d'opération, du jeudi 8 novembre au lundi 12 novembre 2018. À partir des données contenues dans la base de données brute, c'est-à-dire la position GPS du bus seconde par seconde et sa vitesse instantanée, les informations nécessaires ont été déduites. La distance parcourue et l'accélération moyenne entre chaque point ainsi que la date, l'heure et le type de route (primaire, secondaire, tertiaire ou résidentiel) ont été extraits pour chaque point.

### 2.6.2.2 Génération de micro-segments

Trois méthodes différentes de segmentation des micro-segments ont été sélectionnées en priorisant les plus utilisées dans la littérature ou selon celles qui sont réputés plus efficaces. Comme le montre la Figure 16, une segmentation en intervalles de distance fixe de 250 m (D250), une segmentation selon la séquence entre deux arrêts (S0) et une segmentation basée sur des modes de conduite (DM) ont été retenues. Un arrêt est défini comme une séquence de vitesse nulle supérieure à 3 secondes. Les modes de conduite sont détaillés dans la sous-section sur les proportions temporelles des modes de conduite du Tableau 12. La Figure 17 montre un profil de vitesse divisé en micro-segments avec chacune des trois méthodes sélectionnées.

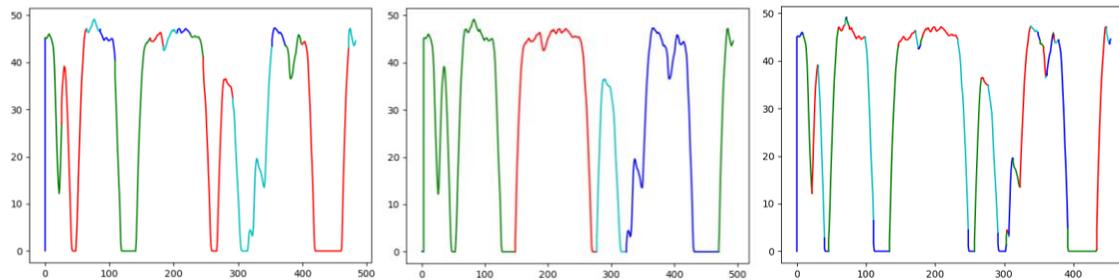


Figure 17. Profils de vitesse de micro-segments générés avec la méthode D250 (gauche), S0 (centre) et DM (droite)

Pour chacune des méthodes de segmentation, un identifiant indique le micro-segments associés à chaque donnée. Ensuite, un deuxième tableau est créé avec l'identifiant de micro-segment comme index et contient tous les paramètres caractéristiques du Tableau 12. Le choix des paramètres caractéristiques des micro-segments est une combinaison de la sélection effectuée par Yuhui et al. (2017) et Peng et al. (2019).

Tableau 12. Paramètres caractéristiques des micro-segments

|   | CP             | Paramètres   | Unitée           |
|---|----------------|--|------------------|
| 1   | T              | Durée du segment   | s                |
| 2   | S              | Distance parcourue   | m                |
| 3   | V              | Vitesse moyenne du micro-segment   | Km/h             |
| 4   | Vr             | Vitesse moyenne de circulation   | Km/h             |
| 5   | Vm             | Vitesse maximale   | Km/h             |
| 6   | Vstd           | Écart type de la vitesse   | Km/h             |
| 7   | acc            | Accélération moyenne des phases d'accélération   | m/s <sup>2</sup> |
| 8   | dcc            | Décélération moyenne des phases de décélération  | m/s <sup>2</sup> |
| 9   | A <sup>2</sup> | Moyenne quadratique de l'accélération  | m/s <sup>2</sup> |
| 10  | acc_std        | Écart type de l'accélération   | m/s <sup>2</sup> |
| Proportion temporelle des modes de conduite : |                |  |                  |
| 11  | Idle_p         | Inactif (vitesse = 0)  | %                |
| 12  | Acc_p          | Accélération (accélération ≥ 0.1 m/s <sup>2</sup> )  | %                |
| 13  | Cru_p          | Croisière (- 0.1 m/s <sup>2</sup> < accélération < 0.1 m/s <sup>2</sup> , Vitesse moyenne > 20 km/h) | %                |
| 14  | Dcc_p          | Décélération (accélération ≤ -0.1 m/s <sup>2</sup> )   | %                |
| 15  | Cre_p          | Rampant (- 0.1 m/s <sup>2</sup> < accélération < 0.1 m/s <sup>2</sup> , Vitesse moyenne < 20 km/h)   | %                |

### 2.6.2.3 Classification des micro-segments

Comme expliqué précédemment, le partitionnement de données permet de classifier les micro-segments en fonction de leurs caractéristiques. Deux algorithmes de partitionnement de données ont été comparés: k-médoïdes (fonction PAM de R) et k-moyennes (fonction kmeans de R). Ces algorithmes nécessitent de définir une mesure de distance entre les micro-segments selon des caractéristiques prédéfinies. Deux façons différentes de définir les micro-segments et la distance entre elles ont été comparées. Nous avons d'abord décrit les micro-segments uniquement en fonction de leur vitesse moyenne et de la proportion de temps d'inactivité – cette méthode sera désignée sous le nom de v\_idle. La distance euclidienne entre les couples de données standardisés est ensuite utilisée dans les algorithmes de partitionnement de données. La Figure 18a montre les groupes de micro-segments générés avec la septième méthode, pour 4 groupes.

De plus, des micro-segments ont été décrits en utilisant les 15 paramètres du Tableau 12 et une analyse en composantes principale (ACP) a été appliquée. Une ACP permet de considérer une grande quantité de variables qui sont ensuite réduites à seulement quelques composantes principales en les décorrélant. Les quatre premières composantes ont été choisies car leur taux de cotisation cumulé est de 84,95% pour la segmentation D250, 92,55% pour la segmentation S0

et 84,66% pour la segmentation DM, ce qui est cohérent avec le taux de compression généralement acceptés de 20% (10) – cette méthode est appelée PCA. Ensuite, nous avons regroupé les micro-segments en utilisant la distance euclidienne entre les quatre composantes principales. La Figure 18b montre une projection des données classifiées sur les deux principales composantes pour la première méthode, pour 4 groupes.

Comme le montre le schéma méthodologique, nous avons comparé les performances des deux méthodes de partitionnement de données avec une classification en intervalles de vitesse (V-range). Les micro-segments ont simplement été classés en fonction de leur vitesse moyenne dans la plage de vitesse qui divise l'intervalle [0, 100] en 10 sous-intervalles de longueur égale. La Figure 18c montre les données classifiées dans leur plage de vitesse avec la cinquième méthode.

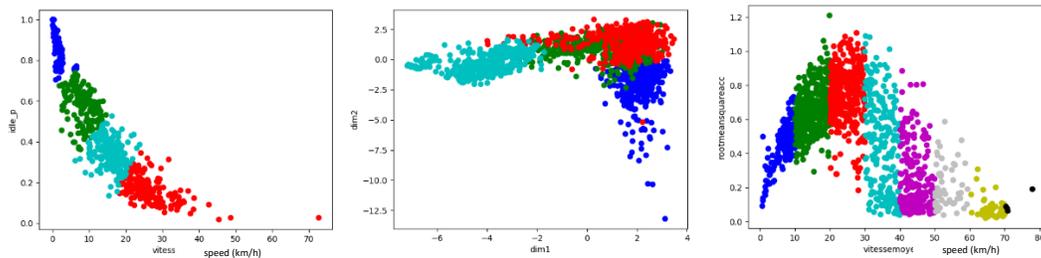


Figure 18. Classification des micro-segments avec la méthode 7 (a), la méthode 1 (b) et la méthode 5 (c)

#### 2.6.1.1 Sélection des critères d'évaluation de performance

Les critères d'évaluation retenus sont ceux sélectionnés par Nouri et Morency (2017), qui ont suivi la sélection des critères d'Ashtari et al. (2014). Ils sont répertoriés dans le Tableau 13. Comme expliqué précédemment, la SAFD est une matrice contenant la distribution des fréquences temporelles de vitesse et d'accélération. La puissance spécifique du véhicule est calculée de la même manière que Ashtari et al. (2014). Les paramètres du Tableau 13 calculés pour l'ensemble de la base de données sont appelés les paramètres cibles TPI. Ils ont également été calculés pour chaque cycle de conduite potentiel et sont appelés paramètres de cycles CPI.

Tableau 13. Critères d'évaluation de performance pour les cycles de conduite

| i   | AC     | Parameters  | Unit |
|---|--------|---|------|
| 1   | SAFD   | Différence des matrices SAFD  | %    |
| 2   | S_     | Vitesse moyenne   | Km/h |
| 3   | RS_    | Vitesse moyenne de circulation  | Km/h |
| 4   | MS     | Vitesse maximale  | Km/h |
| 5   | Acc_   | Accélération moyenne des phases d'accélération                              | m/s2 |
| 6   | Dcc_   | Décélération moyenne des phases de décélération                             | m/s2 |
| 7   | C_     | Nombre moyen de changements accélération-décélération                       | NA   |
| 8   | A^2    | Moyenne quadratique de l'accélération                                       | m/s2 |
| 9   | RP     | Puissance spécifique du véhicule  | kW   |
| Proportion temporelle des modes de conduite : |        |   |      |
| 11  | Idle_p | Inactif (vitesse = 0)   | %    |
| 12  | Acc_p  | Accélération (accélération ≥ 0.1 m/s2)                                      | %    |
| 13  | Cru_p  | Croisière (- 0.1 m/s2 < accélération < 0.1 m/s2, Vitesse moyenne > 20 km/h) | %    |
| 14  | Dcc_p  | Décélération (accélération ≤ -0.1 m/s2)                                     | %    |
| 15  | Cre_p  | Rampant (- 0.1 m/s2 < accélération < 0.1 m/s2, Vitesse moyenne < 20 km/h)   | %    |

#### 2.6.2.4 Développement des cycles de conduite

Une matrice de transition est une matrice carrée contenant les probabilités de transition d'un événement à un autre lors d'un processus de Markov. Dans notre cas, l'intégralité de la base de données est utilisée pour développer une matrice de transition entre les groupes de micro-segments similaires: elle permet de prédire le futur groupe de micro-segment sachant le groupe actuel. Par conséquent, après avoir sélectionné un premier micro-segment au hasard, le groupe du suivant est déterminé à l'aide de la matrice de transition. Le prochain micro-segment est ensuite sélectionné au hasard dans le groupe indiqué. Ces deux étapes sont répétées jusqu'à ce que le cycle atteigne sa durée totale de 30 minutes.

#### 2.6.2.5 Sélection du cycle de conduite

Pour chaque méthode présentée dans le Tableau 1, 800 cycles ont été générés. La différence relative (RDi) entre chacun des paramètres du cycle obtenu (CPi) et les paramètres cibles (TPi) est utilisée pour comparer les cycles Huertas et al. (2019) et est calculée avec l'équation suivant:

$$RD_i = \left| \frac{CP_i - TP_i}{TP_i} \right|$$

Pour tous les critères d'évaluation, les cycles spécifiques à chaque méthode sont triés en ordre croissant selon leurs RDs. Ensuite, comme l'ont montré Nouri et Morency (2017), chaque cycle reçoit un classement en fonction de ses performances sous chaque critère. Le cycle avec le

meilleur classement total est désigné comme le candidat représentatif de sa méthode. Si le RDi est inférieur à 5%, le niveau de similitude entre le cycle et la base de données est considéré comme élevé (Nouri, 2015, Ma et al. 2019).

#### 2.6.2.6 Sélection du nombre d'itérations

Comme l'ont souligné Huertas et al. (2019), l'une des limites de l'approche des chaînes de Markov est que les cycles générés sont différents d'une fois à l'autre. Par conséquent, il devient nécessaire de répéter le processus plusieurs fois afin de sélectionner le meilleur candidat parmi les cycles générés. Certains auteurs soutiennent que 500 itérations permettent à l'intervalle de confiance des RD de se stabiliser. De leur côté, Yu et al. (2008) ont utilisé 100 itérations dans leur processus de sélection de cycle de conduite, de même que pour les cycles de Pékin qui ont été sélectionnés après 100 itérations (Xiao et al. 2012). Nouri (2015) a répété le processus de construction 45 fois avant de choisir le meilleur cycle. Cependant, le nombre d'itérations requises peut dépendre de la méthode de construction du cycle de conduite et de son processus de sélection.

Nous avons donc étudié l'évolution de la RD moyenne pour un nombre d'itérations variable, en fixant la méthode de segmentation de micro-segments et l'algorithme de partitionnement à la première méthode et en fixant le nombre de groupe. Nous avons complété l'ensemble du processus de construction et de sélection des cycles de conduite plusieurs fois pour un nombre d'itérations entre 1 et 1000. L'objectif était d'identifier le nombre d'itérations où la performance du cycle sélectionné se stabilise. La performance a été définie par la RD moyenne et sa variabilité a été quantifiée par l'écart-type. La Figure 19 montre le comportement de la RD moyenne en fonction du nombre d'itérations effectuées. Nous avons remarqué que la performance moyenne du cycle obtenu varie très peu entre 50 et 1000 itérations. En revanche, l'écart type est divisé par 3 entre 50 itérations et 800 itérations, passant de 0,75% à 0,25%. Il ne semble pas y avoir de gain en précision lorsque le nombre d'itérations augmente à 1000. Le nombre d'itérations est donc fixé à 800, car la précision qui lui est associée permettra une meilleure comparaison des performances des 15 méthodes. Ainsi, nous pouvons définir un intervalle d'incertitude de 0,3% autour de nos RD moyennes. Chaque critère a également une marge d'erreur spécifique répertoriée dans le Tableau 14, provenant de son écart-type évalué avec la première méthode.

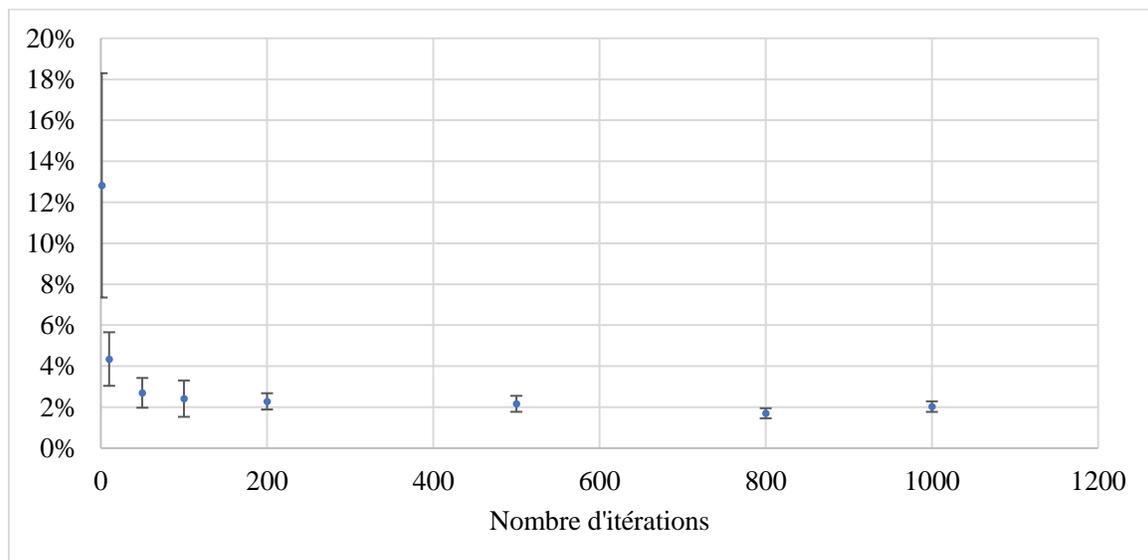


Figure 19. Performance moyenne et écart-type des cycles de conduite pour un nombre d'itération variable

#### 2.6.2.7 *Sélection du nombre de groupes*

Dans la littérature, le nombre de groupes varie généralement entre 2 et 7. Par exemple, Ma et al. (2019) et Karekla et al. (2018) ont regroupé leurs micro-segments en 7 groupes, Zhao et al. (2018) a utilisé 3 groupes et Fotouhi et Montazeri-Gh (2013) ont choisi 4 groupes. Dans d'autres études, le coefficient de silhouette a été utilisé pour déterminer le meilleur nombre de groupes. Le coefficient de silhouette permet de mesurer la qualité d'un partitionnement de données, en calculant la différence moyenne entre la cohésion d'un point et sa séparation avec le groupe voisin le plus proche. Un coefficient de silhouette moyen proche de 1 est associé à une forte cohésion au sein des groupes. Yuhui et al. (2017) ont effectué un partitionnement de données à l'aide de l'algorithme des k-moyennes en utilisant 2, 3 et 4 groupes, et ils ont choisi la configuration en 2 groupes puisqu'elle maximisait la valeur de la silhouette.

Un test préliminaire a permis de vérifier si un coefficient de silhouette proche de 1, et donc une configuration de groupes plus cohésive, correspondait à un meilleur cycle selon les critères d'évaluation de performance. La Figure 20 montre l'évolution du coefficient de la silhouette en fonction du nombre de groupe ainsi que la variation de la RD moyenne pour la première méthode. Les trois meilleures performances de cycles se sont produites avec 8, 2 et 3 groupes pour la première méthode tandis que les meilleurs coefficients de silhouette sont associés aux configurations de 2, 3 et 5 groupes. De plus, les maxima locaux des coefficients de silhouette ne correspondent pas aux minima locaux des RD moyens. Le même test a été répété pour la sixième méthode et la classification des micro-segments en 8 groupes ne se distingue à nouveau que dans le classement des performances de RD. Par conséquent, le coefficient de silhouette ne semble pas être un indicateur de performance significatif pour aider à la sélection du nombre de groupes dans la construction des cycles de conduite. De plus, l'écart type de la RD moyenne est de 0,55%, ce qui signifie que le nombre de groupes a un impact sur les performances du cycle de conduite étant donné que pour une méthode particulière, l'écart type est de 0,3%. Le nombre de groupes est fixé à 8 pour toutes les méthodes afin de pouvoir isoler l'impact des définitions de micro-segments et des méthodes de classification sur les performances.

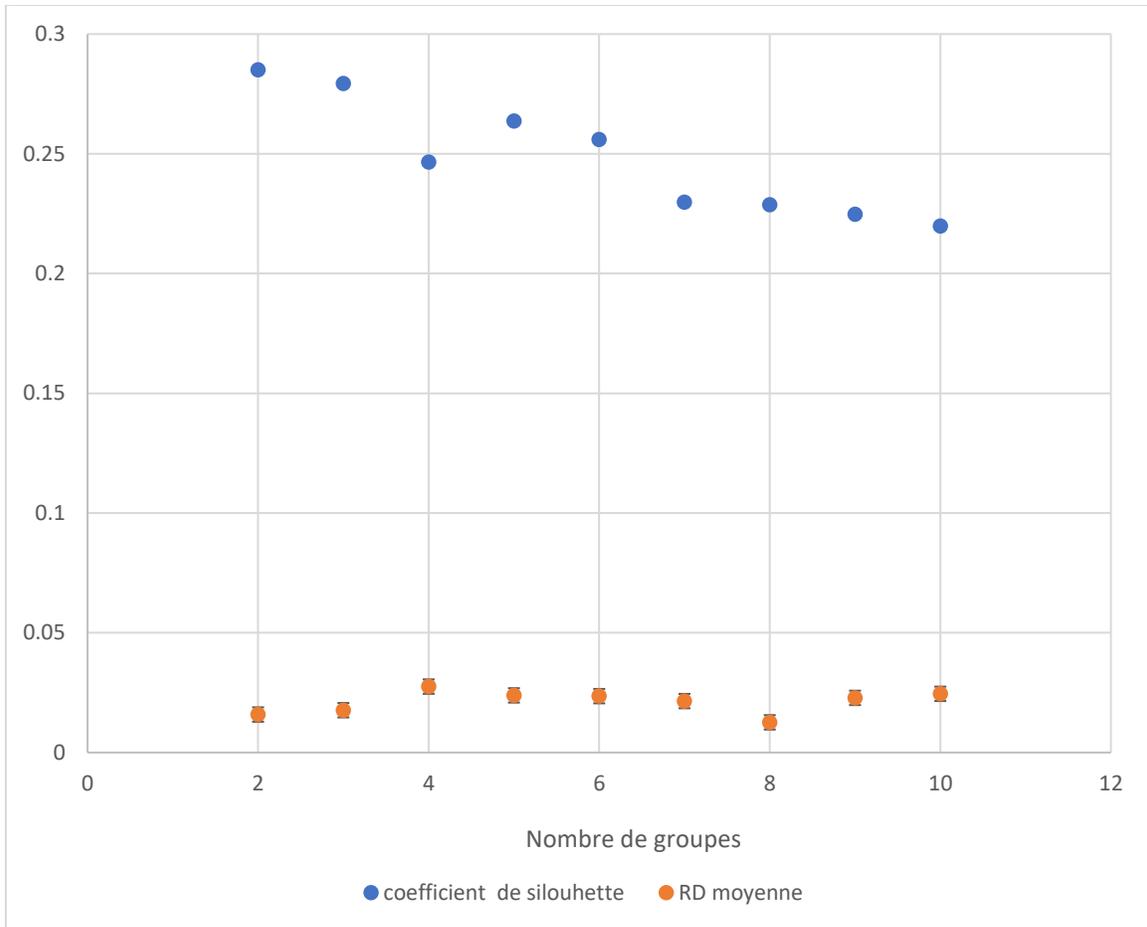


Figure 20. RD moyenne et coefficient de silouhette selon le nombre de clusters pour la première méthode

### 2.6.3 Résultats

Tel que mentionné dans la méthodologie, 15 différentes combinaisons de méthodes de segmentation de micro-segments, d'algorithmes de partitionnement de données et de définitions de micro-segments ont été utilisés pour générer des cycles de conduite. Pour chacune des méthodes, 800 cycles de conduite ont été construits et les meilleurs ont été sélectionnés en raison de leurs performances quantifiées par leur RD. Les RD<sub>i</sub> du meilleur cycle de chaque méthode sont présentés dans le Tableau 14, ainsi que leur RD moyen. Le spectre de couleurs permet de visualiser facilement les meilleures performances (vert) et les pires performances (rouge). La colonne erreur fournit la marge d'erreur spécifique à chaque critère. Pour sélectionner la meilleure méthode, les cycles de conduite représentatifs de chaque méthode sont comparés entre eux avec la méthode de classement détaillée dans la sous-section Développement des cycles de conduite. La RD moyenne n'inclut pas la vitesse maximale RDMS, qui est toujours supérieure à 5%. Cela peut être dû au fait que les données n'ont pas été filtrées a priori et que les valeurs extrêmes peuvent ne pas être valides. Elle n'est donc pas considérée comme valide.

Tableau 14. Performance des 15 méthodes

| Méthode:  | 1    | 2    | 3    | 4     | 5    | 6     | 7    | 8    | 9     | 10   | 11   | 12    | 13   | 14   | 15    | Erreur |
|-----------|------|------|------|-------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|--------|
| MS        | 39%  | 27%  | 43%  | 22%   | 30%  | 33%   | 35%  | 35%  | 36%   | 34%  | 0%   | 22%   | 0%   | 17%  | 17%   | 1%     |
| S_        | 1.0% | 4.5% | 0.5% | 0.4%  | 4.7% | 4.4%  | 1.7% | 3.6% | 0.6%  | 1.2% | 0.4% | 10.8% | 1.2% | 5.6% | 2.9%  | 0.9%   |
| SAFD      | 1.3% | 1.1% | 1.3% | 0.8%  | 1.3% | 1.5%  | 1.6% | 1.6% | 1.7%  | 1.2% | 0.9% | 5.6%  | 0.3% | 5.5% | 6.4%  | 0.2%   |
| Dcc_      | 2.7% | 0.0% | 3.5% | 5.2%  | 0.6% | 2.3%  | 1.3% | 0.2% | 2.0%  | 0.1% | 0.2% | 1.4%  | 1.7% | 4.9% | 5.2%  | 1.8%   |
| Acc_      | 2.2% | 1.6% | 0.6% | 4.1%  | 3.7% | 2.4%  | 1.2% | 2.3% | 0.1%  | 4.0% | 0.3% | 5.9%  | 3.2% | 9.4% | 5.7%  | 1.2%   |
| A^2       | 0.4% | 1.0% | 1.3% | 1.5%  | 7.4% | 0.4%  | 3.4% | 0.7% | 4.0%  | 2.3% | 4.8% | 0.1%  | 3.0% | 5.0% | 10.0% | 1.0%   |
| RP        | 5.0% | 7.6% | 2.3% | 0.6%  | 5.5% | 1.2%  | 0.3% | 3.7% | 0.6%  | 0.8% | 0.3% | 14.5% | 1.9% | 6.8% | 4.4%  | 0.3%   |
| RS        | 0.1% | 2.7% | 3.2% | 0.2%  | 0.2% | 1.9%  | 3.0% | 3.5% | 0.4%  | 0.3% | 2.0% | 9.0%  | 1.0% | 6.1% | 3.6%  | 0.4%   |
| Idle_p    | 2.0% | 3.4% | 6.8% | 1.1%  | 8.7% | 4.6%  | 9.0% | 0.3% | 1.8%  | 2.8% | 7.7% | 6.6%  | 0.7% | 1.7% | 2.1%  | 1.5%   |
| Acc_p     | 4.6% | 1.3% | 0.2% | 1.2%  | 3.7% | 1.8%  | 4.2% | 1.6% | 4.4%  | 4.5% | 4.0% | 0.3%  | 4.9% | 3.2% | 2.6%  | 1.2%   |
| Dcc_p     | 1.0% | 0.6% | 0.3% | 3.1%  | 1.1% | 0.5%  | 1.7% | 1.2% | 0.7%  | 6.0% | 4.2% | 4.5%  | 1.4% | 1.6% | 2.9%  | 1.7%   |
| Cru_p     | 1.8% | 0.9% | 0.1% | 2.2%  | 1.3% | 0.7%  | 3.1% | 1.4% | 2.7%  | 5.5% | 0.0% | 2.2%  | 1.6% | 0.9% | 2.5%  | 0.4%   |
| Cre_p     | 1.8% | 0.9% | 0.1% | 2.2%  | 1.3% | 0.7%  | 3.1% | 1.4% | 2.7%  | 5.5% | 0.0% | 2.2%  | 1.6% | 0.9% | 2.5%  | 0.4%   |
| C_        | 0.7% | 6.5% | 5.0% | 10.2% | 8.2% | 11.2% | 1.7% | 2.8% | 10.2% | 1.5% | 7.3% | 0.3%  | 2.7% | 1.9% | 7.3%  | 2.2%   |
| RD moyen  | 1.9% | 2.5% | 1.9% | 2.5%  | 3.7% | 2.6%  | 2.7% | 1.9% | 2.4%  | 2.7% | 2.5% | 4.9%  | 1.9% | 4.1% | 4.5%  | 0.3%   |
| Rang      | 7    | 3    | 2    | 5     | 11   | 7     | 12   | 5    | 9     | 10   | 1    | 14    | 4    | 13   | 15    |        |
| Rang\{MS} | 4    | 3    | 1    | 8     | 11   | 6     | 12   | 5    | 9     | 10   | 2    | 14    | 6    | 13   | 15    |        |

Comme le montre le Tableau 14, les méthodes 2, 3, 11 et 13 se distinguent par leur bon classement. Au contraire, les méthodes 7, 12, 14 et 15 ont de mauvais rangs et un RD moyen élevé. En regroupant les méthodes avec le même type de segmentation et en calculant leur rang total, nous pouvons observer que la segmentation D250 semble être la meilleure méthode de segmentation, suivie par la segmentation S0 et la méthode de segmentation DM. Étant donné que la matrice SAFD est souvent considérée comme particulièrement représentative des comportements de conduite et pertinente (Huertas et al. 2019), ce critère d'évaluation mérite une attention particulière. La matrice SAFD moyenne a été calculée pour chaque méthode de segmentation et les résultats confirment le classement précédent des méthodes de segmentation. Les résultats sont en accord avec ceux de l'étude précédente menée par Nouri et Morency (2017). De plus, l'analyse montre que l'utilisation d'une ACP sur les 15 paramètres caractéristiques des micro-segments présentés dans le tableau 2 donne les meilleures performances, suivies des méthodes v\_idle et V-range. La comparaison du partitionnement de données avec l'algorithme des k-moyennes et l'algorithme des k-médoïdes n'a montrée aucune différence significative.

#### 2.6.4 Conclusions

Cette étude propose une comparaison systématique des méthodes de développement des cycles de conduite construits à partir de donnée GPS d'autobus. Comme montré ci-dessus, identifier le nombre d'itération requise pour avoir un cycle valide est une étape cruciale étant donnée la nature stochastique du processus de construction. Cette étude a démontré que 800 itérations semblent permettre la stabilisation et l'uniformité de la performance du cycle sélectionné. De plus, cette étude montre que le nombre de groupes sélectionné dans les algorithmes des k-moyennes et des k-médoïdes a un impact sur la performance du cycle final, mais que le coefficient de silhouette ne semble pas être un bon indicateur de la performance d'un cycle de conduite. Il a

aussi été confirmé que la segmentation en distance fixe de 250 m est la meilleure méthode parmi les trois méthodes de segmentation testées. De plus, il a été découvert que la classification des micro-segments est meilleure lorsque celles-ci sont caractérisées par plusieurs paramètres comme dans la Table 1, puis regroupées via un algorithme de partitionnement de données tels que k-moyennes ou k-médoïdes.

Des recherches plus approfondies seront nécessaires pour confirmer ces résultats, entre autres en augmentant la taille (jours d'observation), la couverture (types de segments et échantillons de routes) et la diversité (types de véhicules et techniques de collecte de données) des données utilisées en entrée.

Une performance plus constante pour une même méthode facilite leur comparaison : ainsi, des méthodes additionnelles pourraient être évaluées. Par exemple, la mesure de distance utilisée par Andre (2004), c'est-à-dire la distance du chi carré des matrices de distribution des fréquences temporelles de vitesse et d'accélération (SAFD) n'a pas été évaluée dans cette étude, pas plus que la méthode de partitionnement de donnée fuzzy C-means (9) . De plus, comme souligné par Xiao et al. (2012), il serait pertinent d'étudier la performance des cycles non pas en comparant des critères de performance, mais plutôt en évaluant la capacité des cycles à prévoir les émissions en utilisant des données de consommation de carburant.

## 2.7 Perspectives sur l'utilisation du réseau routier et la capacité globale d'une ville

- Par : Fabien Piotrowski, stagiaire de recherche et Hubert Verreault, Associé de recherche
- Contexte : Chaire Mobilité

### 2.7.1 Introduction

Dans le contexte de la croissance de la motorisation et des impacts négatifs associés à l'utilisation généralisée de la voiture privée (pollution de l'air, GES, sécurité, consommation de l'espace, etc.), plusieurs villes sont à la recherche de stratégies permettant de réduire la part de l'automobile privée dans les déplacements quotidiens. Les stratégies ciblant directement la réduction du nombre de véhicules privés ne sont typiquement pas en haut de la liste, non pas en raison de leur inefficacité, au contraire, mais plutôt car elles sont plus difficiles à implanter en raison des défis d'acceptabilité sociale qu'elles présentent.

Ainsi, il n'existe pas de cible précise concernant le nombre de voitures qui devraient être tolérées dans certains territoires pour limiter leurs impacts négatifs à un seuil acceptable. Les mesures présentées dans cette section ont justement comme objectif de mettre en lumière l'utilisation des véhicules privés en fournissant différents indicateurs qui permettent une analyse objective de l'utilisation du réseau routier. Ces estimations sont un préambule au développement d'un indicateur de capacité globale d'accueil de véhicules (CGAV) dont l'objectif est d'assister dans l'identification du nombre maximum de véhicules privés qu'une ville peut / devrait accepter pour maintenir les impacts négatifs au recours à ces véhicules à un niveau acceptable. Cette section propose différents indicateurs d'utilisation du réseau routier ainsi qu'une typologie de segments routiers basée sur ces indicateurs. La région de Montréal est utilisée comme étude de cas pour le développement de ces indicateurs et leur estimation.

Les objectifs plus spécifiques sont :

- Analyser le taux d'utilisation du réseau routier, par segment, en fonction du lieu de résidence des automobilistes, et ce afin d'évaluer objectivement ceux qui bénéficient de ces infrastructures et ceux qui subissent les impacts négatifs de leur utilisation. Ceci permettra de mettre en lumière le déséquilibre entre ces deux composantes.
- Développer une typologie de segments routiers à l'aide de techniques de classification automatique sur la base de différents indicateurs d'usage.

Historiquement, selon le point de vue de l'ingénierie des transports, les stratégies d'optimisation de la circulation visaient à améliorer la fluidité notamment par l'augmentation de la capacité des infrastructures ou par des techniques d'optimisation basées sur la signalisation aux bénéfices de la circulation routière. Bien qu'une telle approche ne soit plus vue comme étant la seule option possible aujourd'hui, cela demeure encore souvent le cas. En outre, si l'augmentation de la capacité routière n'est plus perçue comme étant une approche durable de gestion de la mobilité, il n'existe toujours pas actuellement de lignes directrices concernant le nombre de véhicules privés qu'un secteur peut ou devrait accepter. Néanmoins, l'enjeu de qualité de vie dans les quartiers est un enjeu qui prend de plus en plus d'importance et, pour l'aborder correctement, il serait judicieux de pouvoir estimer combien de véhicules devraient être acceptés dans un quartier et d'avoir des justifications objectives permettant de soutenir l'application de stratégies visant à réduire justement le nombre de véhicules dans un quartier (tant les véhicules des résidents que des non-résidents).

Cette section est organisée comme suit : d'abord, quelques éléments de littérature sont présentés concernant les approches de classification de segments routiers, les indicateurs de caractérisation

des segments routiers, les aspects d'équité ainsi que le concept de capacité routière. La méthodologie est ensuite présentée, notamment les différentes étapes requises pour procéder à l'estimation des indicateurs et classer les segments. Les résultats sont ensuite présentés et discutés. Les distributions des indicateurs à travers les différents segments sont notamment analysées ainsi que les groupes de segments résultant de la classification. Différents éléments de conclusion sont ensuite proposés ainsi que des perspectives de recherche.

### 2.7.2 État des connaissances

Si, aussitôt qu'en 1963, le rapport de Buchanan (Growther, 1964) a mis en lumière les enjeux environnementaux, de santé publique et de congestion associés à l'augmentation de la circulation routière, peu d'études dans la littérature scientifique tentent d'établir une limite raisonnable au nombre de véhicules qui devraient circuler sur un réseau routier afin de garantir une bonne qualité de vie à ses citoyens. Cet état des connaissances s'intéresse d'abord aux indicateurs d'utilisation des segments routiers ainsi qu'à leur classification. Ensuite, le concept d'équité est examiné dans une perspective d'évaluation des impacts (positifs et négatifs) découlant de l'usage des segments routiers. Finalement, le concept de capacité routière est abordé.

#### 2.7.2.1 Classification des routes et indicateurs d'utilisation

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour classer les segments routiers. Les conditions de circulation comme la congestion sont des facteurs importants à considérer. La congestion peut être étudiée de façon classique, à l'aide de données provenant d'enquêtes sur la mobilité combinées à des modèles d'affectation de déplacement. Dans plusieurs villes, la circulation automobile augmente alors que la capacité du réseau de transport ne change pas (Hassan et al. 2011). Ces constats peuvent être raffinés en catégorisant les différents types de conditions de circulation (normales, pointes, événements spéciaux, etc.). Yang et al. (2017) ont développé ce type de raffinement dans leur étude : à l'aide de méthodes de classification, ils analysent les variations des conditions de circulation et associent un type à ces variations.

Il est aussi possible d'analyser l'efficacité d'un réseau routier en fonction de la distribution des différents types d'usages du sol et de la présence de générateurs de déplacements à travers le territoire. Zhao et al. (2014) s'intéressent à identifier des solutions d'optimisation de la circulation à coût minimum. Ils examinent aussi les liens entre l'évolution du réseau de transport et la distribution des lieux d'activités, aux investissements dans les infrastructures et à leur capacité. Leur modèle vise à permettre d'identifier quelles routes doivent être construites ainsi que leur importance dans le réseau. Levinson (2008) et Barthélémy et Flammini (2009) démontrent le lien entre la distribution des usages des sols et la structure des réseaux de transport dans une ville.

De plus, le concept de capacité environnementale a été abordée par différents chercheurs depuis 1963. Li et al. (2009) définissent le nombre raisonnable de véhicules attendus à un moment donné pour un espace donné et ce, tenant compte de la congestion, de la structure du réseau de transport et des conditions environnementales. Dans leur article, une analyse par mailles est utilisée pour croiser les données de congestion et de pollution. À ce jour, le phénomène de diffusion des polluants et les facteurs météorologiques ont été considérés globalement pour l'estimation de la capacité environnementale de circulation. Plusieurs améliorations peuvent être apportées. Par exemple, dans un contexte urbain, la morphologie des villes devrait être considérée dans l'analyse des indicateurs de pollution. Par exemple, l'étude de Zhang et al. (2019) mesure l'impact de la différence de hauteurs dans les bâtiments d'une ville sur le niveau de pollution et la circulation de l'air.

### 2.7.2.2 *Considération des enjeux d'équité*

Ceux qui bénéficient des infrastructures de transport ne sont pas toujours ceux qui vont en subir les impacts négatifs (découlant des véh-km parcourus). Tel que montré dans NCHRP (2002), Weisbrod (2007) et Iacono et Levinson (2015), les investissements en transport se traduisent par différents bénéfices. Les infrastructures de transport, notamment les autoroutes, ont un effet structurant tant en terme économique que sur la création d'emplois. He et al. (2014) et Seitz (1993) indiquent aussi qu'investir dans les autoroutes stimule la croissance économique et la création d'emplois. Similairement, des analyses d'impacts économiques dans le secteur du tourisme ont démontré l'impact positif du développement du réseau routier dans les territoires ruraux (Rolfe et Flint, 2018).

Fernandes et al. (2019) montrent les différentes externalités relatives à la circulation automobile et à la congestion. Ils proposent un indicateur qui tient compte de ces externalités dans une perspective de développement durable. Ainsi, il pourrait être pertinent de tenir compte de ces facteurs dans l'étude des individus bénéficiant et subissant les impacts des infrastructures routières. En outre, Lindsey (2012) montre que la congestion a un coût important sur les usagers. Il indique aussi que les péages permettent d'optimiser la circulation afin d'atteindre un niveau optimal de congestion.

Plusieurs études (Jouffe et al., 2015, Sustainable Development Commission UK, 2011, Currie et al. 2009, Litman, T., 2002) indiquent que les inégalités en mobilité sont un facteur important à considérer dans l'analyse de ceux qui bénéficient et subissent les impacts d'infrastructures. Actuellement, les inégalités relatives à la mobilité sont importantes puisque celle-ci s'appuie encore de façon dominante sur l'automobile – sa possession étant encore aujourd'hui une valeur importante toutefois pas accessible à tous. Mattioli (2014) aborde cette question : il montre que la proportion de ménages sans véhicule est un bon indicateur du niveau de dépendance à l'automobile dans un quartier. Prioriser le véhicule privé se fait typiquement aux dépens d'une partie de la population qui ne possède pas de véhicule et ceci peut créer des décalages d'opportunités. Cette fracture est accentuée dans les zones rurales où l'automobile est essentielle pour se déplacer.

De plus, le profil des usagers bénéficiant des infrastructures peut aussi être caractérisé selon les habitudes de ces usagers. Dans son étude, Sajous (2017) montre que le choix du mode de transport par un individu ne peut pas toujours s'expliquer rationnellement et que les habitudes des voyageurs doivent être considérées.

### 2.7.2.3 *Notion de capacité des réseaux*

La capacité d'un segment routier est un concept qui existe depuis le développement des modèles de transport. Ainsi, la capacité d'un réseau de transport, à une échelle globale, est un concept qui a été abordée dans quelques études. Hassan et al. (2011) proposent une méthode pour estimer la capacité de circulation d'une zone (Area Traffic Capacity – ATC). L'ATC peut être définie comme étant le nombre de véhicules qui, à un moment donné, peuvent circuler ou se stationner à l'intérieur d'une zone. Cette capacité est soit limitée par la capacité interne du réseau, par la capacité de stationnement ou par la capacité des liens permettant d'accéder à la zone. L'article de Liu et al. (2015) adoptent une approche similaire : ils tentent d'identifier un lien mathématique entre la capacité de transport, la capacité des nœuds du réseau de transport et la longueur moyenne des liens du réseau.

Selon Saha et al. (2018), il peut aussi être intéressant d'utiliser une méthode de krigeage pour estimer la capacité maximale d'une intersection (les éléments limitant d'un réseau selon les auteurs). Le modèle qu'ils développent s'appuie principalement sur la géométrie des

infrastructures, la paramètres de la circulation (incluant la composition de la flotte de véhicules) et le pourcentage de véhicules qui tournent à droite. Leur méthode a trois principaux avantages : elle peut être utilisée localement ou globalement, elle fournit un indicateur linéaire non biaisée et elle exige moins de données que les régressions conventionnelles (Biswas et al. 2016 adoptent aussi cette approche par krigeage). Néanmoins, cette méthode dépend de la qualité des données utilisées pour la calibrer. Smeed (1966) propose d'examiner la capacité d'un centre-ville en s'appuyant sur l'espace requis par un véhicule. Son étude tient compte de différents critères comme la configuration du réseau routier.

### 2.7.3 Méthodologie

Dans le contexte de l'estimation de la CGAV d'une zone, il est pertinent de mesurer l'utilisation du réseau routier et de classer les segments sur la base de différents indicateurs d'utilisation. À terme, la typologie de segments pourra être utilisée pour estimer la capacité globale afin de, par exemple, mettre en lumière quelques aberrations sur la conception et l'usage de segments résidentiels principalement par des non-résidents.

#### 2.7.3.1 Méthodologie générale

Cette étude s'appuie sur les données de l'enquête Origine-Destination (OD) 2013 de la Grande Région de Montréal (GRM). L'échantillon de données compte quelque 79 000 ménages et plus de 400 000 déplacements. Parmi ceux-ci, 228 000 sont des déplacements faits en véhicule privé comme conducteur (AC) et 54 500 sont faits en automobile privée comme passager (AP). Les données disponibles incluent les points d'origine et de destination de chaque déplacement. Cependant, la route empruntée pour se déplacer entre ces deux points n'est pas connue. Un calcul du plus court chemin est donc effectué afin d'attribuer à chaque déplacement un itinéraire plausible. Le calcul est effectué avec OSRM (Open-Street Map Routing Machine) et les données routières d'OSM (Open Street Map) pour la région de Montréal. De plus, afin de tenir compte du phénomène de congestion, les vitesses sur chaque lien du réseau sont modifiées pour représenter le plus justement possible les conditions typiques de déplacement à chaque heure de la journée. Ces vitesses sont estimées à l'aide de points GPS provenant d'une flotte de taxis opérant dans la région.

Le réseau routier sélectionné pour l'étude inclut tous les segments autoroutiers de la région. Au total, le réseau inclut quelque 2000 km de routes (bidirectionnelles). De plus, le réseau est séparé en segments sur la base des entrées et sorties d'autoroute. Au total, autour de 2000 segments routiers sont utilisés dans les estimations (les segments ayant des longueurs de moins de 100 mètres ne sont pas considérés). La longueur des segments varie entre 0.1 km et 9.32 km avec une longueur moyenne de 0.82 km. Les analyses qui suivent sont basées sur l'objet « segment ».

Sur la base de ces données, la méthodologie proposée implique différentes étapes :

- L'extraction des déplacements faits en automobile comme conducteur et passager ;
- Calcul du chemin le plus court pour chaque déplacement et association du déplacement à chaque segment routier concerné ;
- Développement et estimation de quatre indicateurs décrivant l'usage des segments routiers :
  - Un index d'entropie
  - Un pseudo taux d'utilisation
  - Un taux d'occupation des véhicules
  - Un pourcentage de VUS et camionnettes

- L'application d'une méthode de classification sur les indicateurs précédents pour créer des groupes de segments.

### 2.7.3.2 Indicateurs

Pour catégoriser les segments routiers, différents indicateurs ont été développés en utilisant principalement les données présentées précédemment. Ces indicateurs peuvent être définis comme suit :

- 1) L'index d'entropie est estimé sur la base de la diversité des lieux de domicile des automobilistes empruntant les différents liens du réseau. Il indique si un segment est d'usage métropolitain (utilisé par des automobilistes provenant d'une grande diversité de lieux de domicile) ou local (utilisé par les résidents de quelques secteurs seulement). L'enquête OD a été utilisée pour estimer le nombre de véhicules circulant sur chaque segment routier, en conservant le lieu de domicile du conducteur. Ceci permet d'identifier les principaux usagers des infrastructures. L'indicateur d'entropie pour un segment donné (i) est défini comme le ratio entre le nombre de déplacements faits par les conducteurs locaux (vivant dans la municipalité ou le secteur dans lequel est localisé le segment routier) et le nombre total de déplacements observés sur le segment.

$$\text{entropy}_i = \frac{\text{number of trips made by local drivers}_i}{\text{total number of trips observed}_i}$$

Ainsi, si l'indicateur tend vers 1, le segment est principalement utilisé par les conducteurs vivant dans le quartier du segment alors qu'inversement, si l'indicateur tend vers 0, le segment est utilisé par une grande diversité, d'un point de vue lieu de résidence, de conducteurs. Ces derniers ont donc une fonction métropolitaine.

- 2) Un indicateur montrant le pseudo taux d'utilisation du segment (i). L'enquête OD est utilisée pour calculer un taux d'utilisation des différents segments du réseau autoroutier. Puisque cette enquête ne porte que sur les déplacements des résidents, une capacité théorique basée résidents (CTBR) est estimée pour chaque segment. Celle-ci correspond au nombre maximum de voitures observées sur un segment pendant une heure donnée. Ainsi, le pseudo taux d'utilisation de chaque segment correspond à la proportion de cette capacité théorique pour chaque segment (voir équation ci-dessous). Évidemment, ce taux d'utilisation n'est considéré un bon proxy que si le segment subit, à un moment donné, un bon niveau de congestion. Il permet néanmoins d'observer la variabilité d'utilisation des segments à travers la journée. C'est la raison pour laquelle il s'agit d'un pseudo taux d'utilisation. La composition de la flotte de véhicules, à ce stade, est négligée.

$$\text{pseudo - utilization rate}_i = \frac{\text{effective number of vehicles}_i}{24 * \text{maximum}_{24h}_i}$$

- 3) Un indicateur montrant le nombre de moyen de passagers par véhicule (taux d'occupation des véhicules). Encore, les données de l'enquête OD sont utilisées pour estimer le nombre moyen de passagers par véhicule sur chaque segment.

$$\begin{aligned}
 & \textit{occupancy rate}_i \\
 & = \frac{\textit{number of car driver trips} + \textit{number of car passenger trips}_i}{\textit{number of car driver trips}_i}
 \end{aligned}$$

- 4) Finalement, un indicateur montrant le pourcentage de VUS au sein des véhicules privés empruntant les différents segments. Les données utilisées pour estimer cet indicateur sont les données de l'enquête OD mais aussi les données de composition de la flotte de véhicules privés de la SAAQ (2017). La part de VUS dans la flotte de véhicules par région, telle que fournie par les données de la SAAQ, a été attribuée aux véhicules utilisés selon l'OD ce qui permet d'estimer la part de VUS sur chaque segment. Pour chaque segment, ce pourcentage correspond à :

$$\begin{aligned}
 & \textit{percentage\_SUV}_i \\
 & = \frac{\sum_j^{\textit{regions}} \textit{percentage\_SUV}_{\textit{region } j}_i \cdot \textit{car\_drivers\_trips\_number}_{\textit{region } j}_i}{\textit{total number of car drivers trips}_i}
 \end{aligned}$$

Ainsi, le nombre de kilomètres parcourus et subis par et dans chaque municipalité a été estimé afin de pouvoir faire le bilan des bénéfices et impacts de la circulation sur les différents segments autoroutiers. Il est intéressant d'observer quels automobilistes (selon leur lieu de résidence) voyagent le plus et quels résidents sont les plus touchés par les kilomètres parcourus. Avec les données d'enquête OD, les kilomètres parcourus et subis par les résidents des différentes régions sont calculés et comparés.

### 2.7.3.3 Classification

À l'aide des précédents indicateurs, une classification des segments autoroutiers est effectuée. Différentes expérimentations ont été effectuées et la classification retenue s'appuie sur le taux d'occupation des véhicules, le pseudo taux d'utilisation, l'entropie de provenance des automobilistes et le pourcentage de VUS. Les résultats montrés ci-dessous ont été obtenus avec R (package FPC), à l'aide de la méthode des k-médoïdes (Kaufman et Rousseeuw, 1987). Le nombre de groupes est déterminée via la fonction pamk() (« Partitioning Around Medoids With Estimation Of Number Of Clusters») et ceux-ci sont déterminés grâce à la fonction pam().

### 2.7.4 Résultats

Dans cette section, les résultats des quatre indicateurs sont d'abord présentés. L'analyse des bénéfices et impacts des déplacements sont ensuite examinés. Finalement, l'analyse de classification produite sur la base des indicateurs exposés est décrite.

#### 2.7.4.1 Entropie des lieux de résidence des automobilistes

L'indicateur d'entropie permet d'observer le caractère local ou métropolitain des différents segments. Ainsi, si l'indicateur approche 1, le segment est utilisé par des conducteurs de peu de régions, plausiblement ceux résidant à proximité du segment alors que si l'indicateur approche 0, cela dénote un segment utilisé par une grande variété de conducteurs; ces segments ont donc un usage davantage métropolitain. La Figure 21 présente à la fois la distribution fréquentielle des indicateurs d'entropie (sur la base du nombre de kilomètres ayant une certaine valeur d'entropie) ainsi que la spatialisation de ces indicateurs à travers les différents segments autoroutiers.

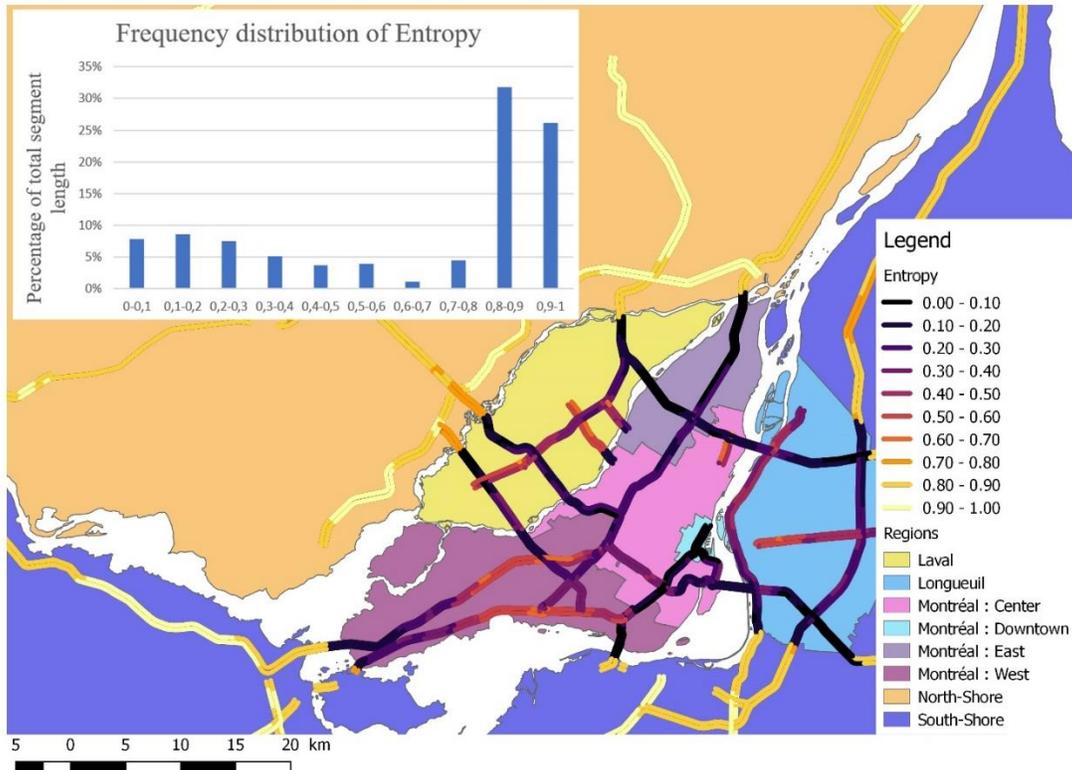


Figure 21. Entropie de provenance des automobilistes empruntant les différents liens du réseau autoroutier

#### 2.7.4.2 Pseudo taux d'utilisation des segments routiers

Le pseudo taux d'utilisation montre, pour les segments achalandés, le taux d'utilisation sur une période de 24 heures alors que pour les segments moins achalandés (en banlieue par exemple), il permet d'observer la variation d'utilisation des infrastructures de transport. La Figure 22 présente les résultats de cet indicateur.

La distribution permet d'observer une concentration des valeurs entre 0.24 et 0.34. Spatialement, les plus fortes valeurs sont aussi concentrées, le point névralgique étant situé autour de la fonction entre Montréal ouest et Montréal centre où on peut observer plusieurs segments avec de hautes valeurs de taux d'utilisation. De plus, le pseudo taux d'utilisation est supérieur dans Montréal Centre qu'en périphérie, ce qui n'est pas surprenant non plus. Néanmoins, le taux quotidien est relativement bas, avec un maximum de 44%, reflétant le fait que les infrastructures routières ont une importante capacité résiduelle sur une base quotidienne (jour de semaine).

Cependant, les résultats obtenus doivent être nuancés : la capacité maximale estimée par le biais du nombre maximum horaire de véhicules privés découlant des déplacements faits par les résidents de la grande région de Montréal demeure une valeur théorique qui néglige les autres types de véhicules empruntant le réseau (camions, véhicules commerciaux, véhicules des non-résidents) ce qui se traduit par une sous-estimation de la capacité offerte et de l'usage observé. En fait, sur les segments où le niveau d'utilisation est plutôt faible, cette valeur n'est pas une bonne approximation de la capacité comme cela peut l'être pour les segments très achalandés. Sur les segments moins utilisés, l'indicateur fournit plutôt une évaluation de la variabilité de leur utilisation. Par exemple, dans les régions périphériques notamment les couronnes nord et sud, le pseudo taux d'utilisation est autour de 40% puisque le maximum théorique se situe sans doute loin de la capacité réelle. Par conséquent, lorsque le segment est peu utilisé, même en période

de pointe, la valeur maximale demeure éloignée de la capacité réelle que peut accommoder l'infrastructure.

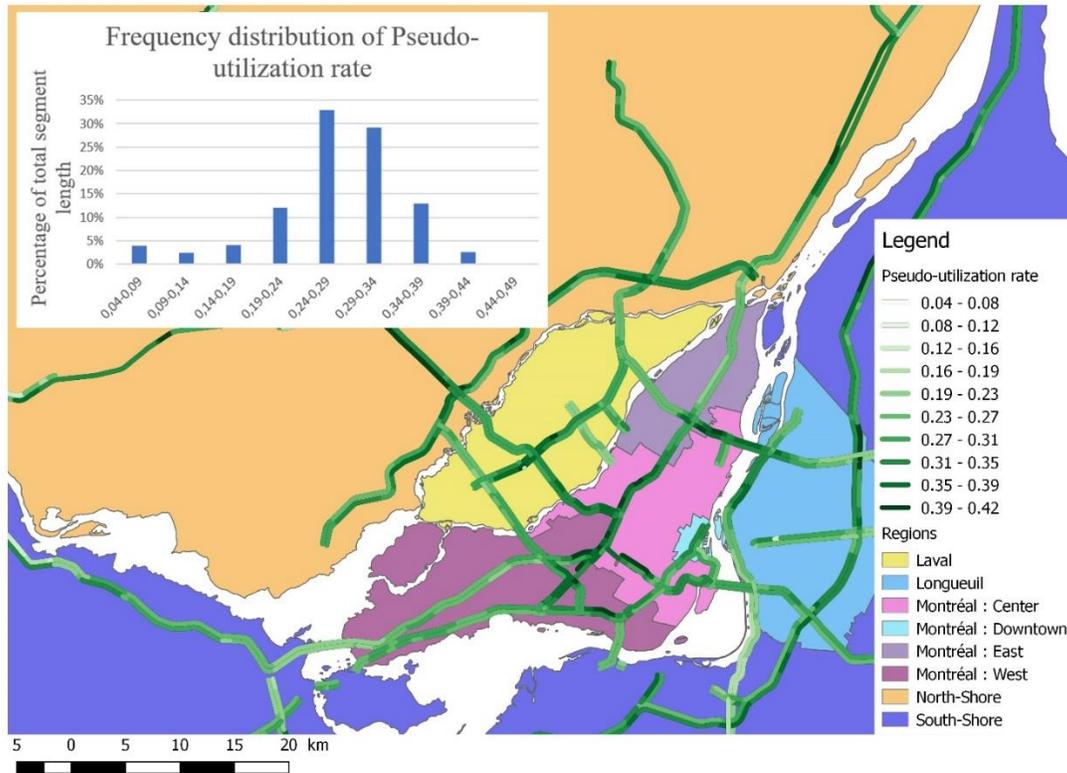


Figure 22. Pseudo taux d'utilisation des segments routiers

### 2.7.4.3 Taux d'occupation des véhicules

Toujours à l'aide des données de l'enquête OD, le nombre moyen de passagers par véhicule est estimé pour chaque segment routier. La Figure 23 présente la distribution fréquentielle du taux d'occupation véhicule (en % de kilomètres de segments). On observe peu de variation à travers le réseau. Le taux d'occupation varie entre 1.10 et 1.25 passager/véhicule à Montréal. Le taux est légèrement plus élevé en périphérie avec des valeurs variant entre 1.10 et 1.35 passager par véhicule.

### Comparaison entre le nombre de personnes transportées et le nombre de sièges disponibles

Ces taux d'occupation demeurent pourtant bien deçà de la capacité véhiculaire qui se situe typiquement à 5 passagers par véhicule. Si on considère l'A40 qui traverse Montréal d'ouest en est, le nombre de personnes transportées par véhicule est loin d'être optimisé. Si on compare le nombre de personnes transportées en moyenne sur chaque segment au nombre de sièges disponibles (sans ajouter de véhicules), on pourrait transporter 4.4 fois plus de personnes que ce qui est observé.

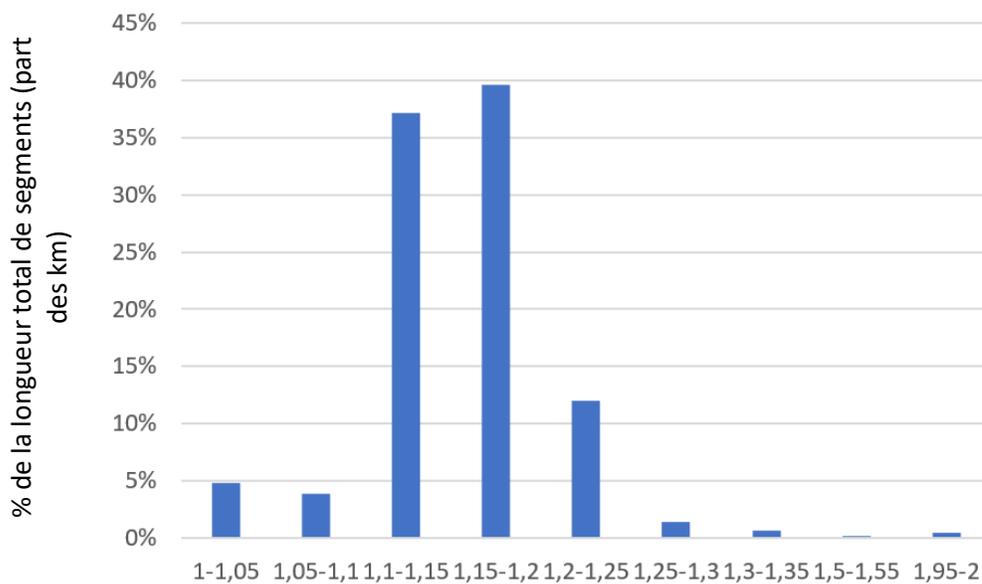


Figure 23. Distribution fréquentielle du taux d'occupation des véhicules

#### 2.7.4.4 Proportion de VUS et camionnettes sur les segments routiers

L'indicateur représentant la part de VUS s'appuie sur les données de la SAAQ disponibles par région. La Figure 24 présente la distribution spatiale du pourcentage de VUS circulant sur les différents segments du réseau autoroutier.

D'abord, la proportion de VUS varie peu à travers les segments : seule une différence de 4% est observée entre les valeurs minimale et maximale. Ensuite, on peut observer que l'utilisation de VUS est supérieure sur les segments périphériques, la valeur étant encore plus élevée sur la couronne nord. En outre, la part semble augmenter avec l'éloignement du centre-ville.

Les données de la SAAQ permettent aussi d'observer que le nombre et la part de VUS dans la flotte de véhicules ont considérablement augmenté dans les récentes années. Cette augmentation a un impact important sur la capacité de transport de personnes des segments routiers puisque l'augmentation de la taille des véhicules, à taux d'occupation constant, fait diminuer la densité de passagers. Le taux d'occupation est par ailleurs en diminution ce qui affecte aussi à la baisse la densité de passagers sur les réseaux.

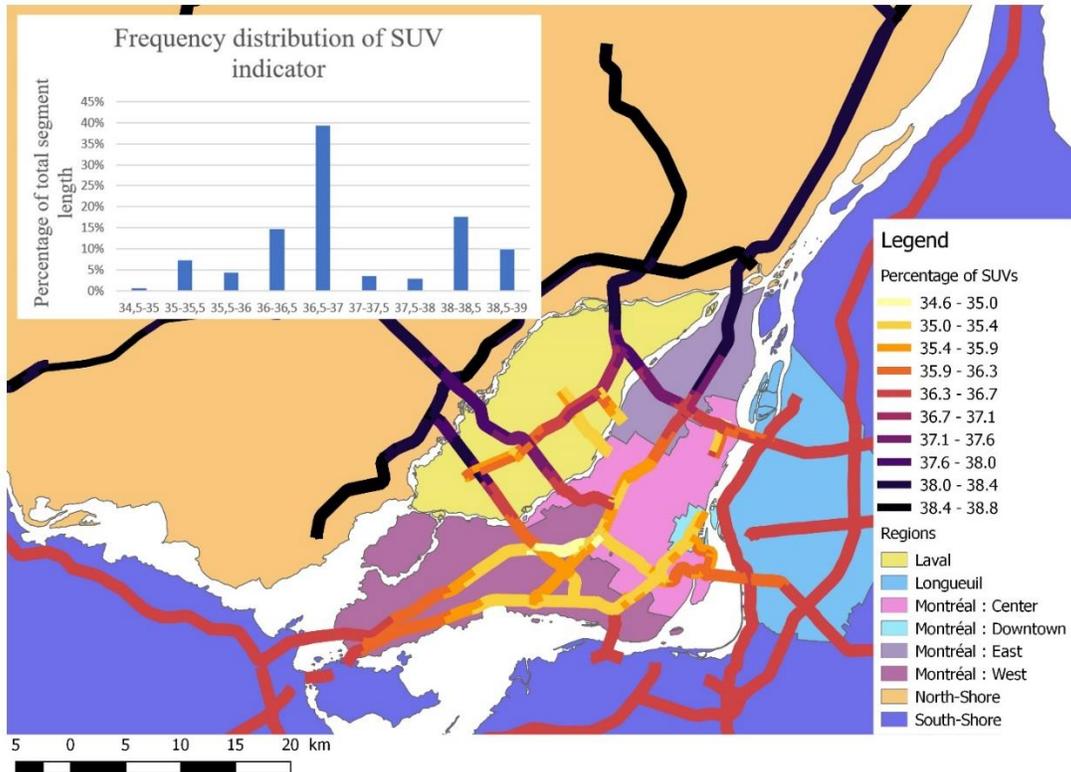


Figure 24. Pourcentage de VUS sur les différents segments autoroutiers

#### 2.7.4.5 Bénéfices et impacts des déplacements automobiles

Les bénéfices et impacts négatifs des déplacements en automobile sont ensuite calculés, sur la base des mêmes données d'affectation des déplacements sur les réseaux. La Figure 25 présente les kilomètres parcourus et subis par les résidents des différentes régions ainsi que le ratio entre les deux. Un ratio différent de 1 indique soit que les résidents subissent davantage de véh-km qu'ils n'en génèrent (>1) soit l'inverse (<1). Ceci permet d'observer le déséquilibre entre les bénéfices et impacts des résidents des différentes régions.

Tel qu'attendu, les résidents des régions périphériques consomment davantage de kilomètres en véhicules que ceux des territoires plus centraux. Le ratio entre les kilomètres subis et parcourus montre que ce sont les résidents du centre qui sont les plus impactés par le déséquilibre, ceux-ci subissant 3.4 fois plus de kilomètres en automobile qu'ils n'en génèrent. Le ratio diminue grosso modo avec l'éloignement du centre-ville.

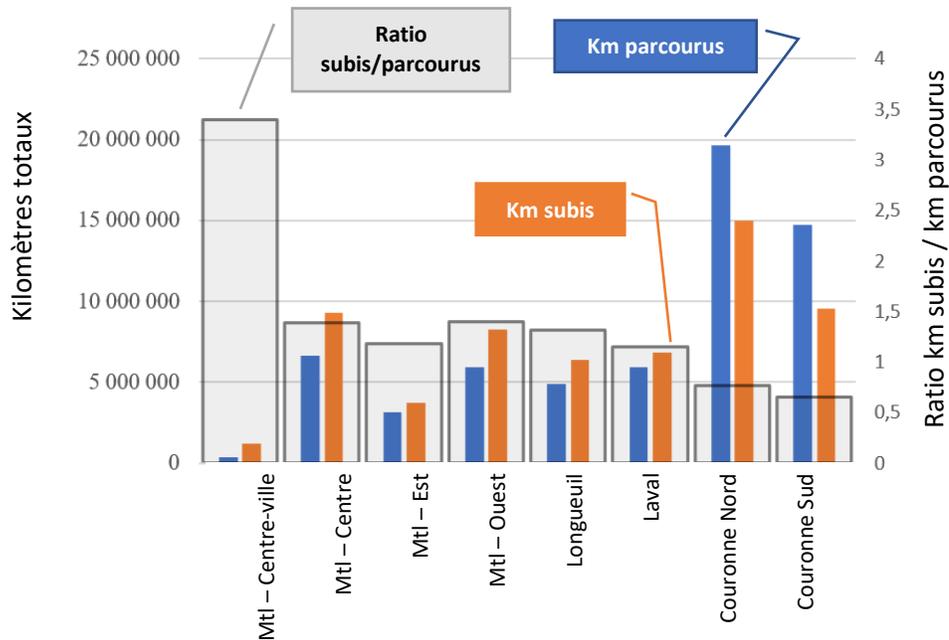


Figure 25. Impacts et bénéfices des kilomètres cumulatifs parcourus sur les segments localisés dans les différentes régions (conducteurs seulement)

#### 2.7.4.6 Définition des types de segments (classification)

Ces indicateurs sont utilisés pour classifier les segments à l'aide de la méthode des k-médoides. Le Tableau 15 présente les propriétés des groupes de segments créés, notamment le nombre de segments inclus dans chaque groupe, le nombre total de kilomètres d'autoroutes de ce type ainsi que les valeurs moyennes des indicateurs utilisés dans la classification. La Figure 26 présente la distribution géographique des différents types de segments.

Tableau 15. Propriétés des groupes

| Type   | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>Nombre de segments</b>  | 627   | 280   | 322   | 496   | 427   | 316   | 88    | 25    |
| <b>Longueur totale des segments (km)</b>                           | 382   | 134   | 131   | 286   | 268   | 251   | 75    | 16    |
| <b>Distance moyenne entre les segments et le centre-ville (km)</b> | 33,9  | 11,7  | 8,1   | 13,3  | 31,3  | 33,0  | 45,0  | 70,6  |
| <b>Taux moyen d'occupation des véhicules</b>                       | 1,158 | 1,161 | 1,141 | 1,148 | 1,146 | 1,193 | 1,053 | 1,444 |
| <b>Pseudo taux moyen d'utilisation</b>                             | 0,293 | 0,275 | 0,325 | 0,282 | 0,250 | 0,291 | 0,176 | 0,106 |
| <b>Entropie moyenne</b>  | 0,822 | 0,483 | 0,314 | 0,290 | 0,816 | 0,863 | 0,636 | 0,299 |
| <b>Pourcentage moyen de VUS</b>                                    | 38,1  | 35,8  | 35,9  | 36,6  | 36,6  | 36,8  | 37,1  | 38,7  |

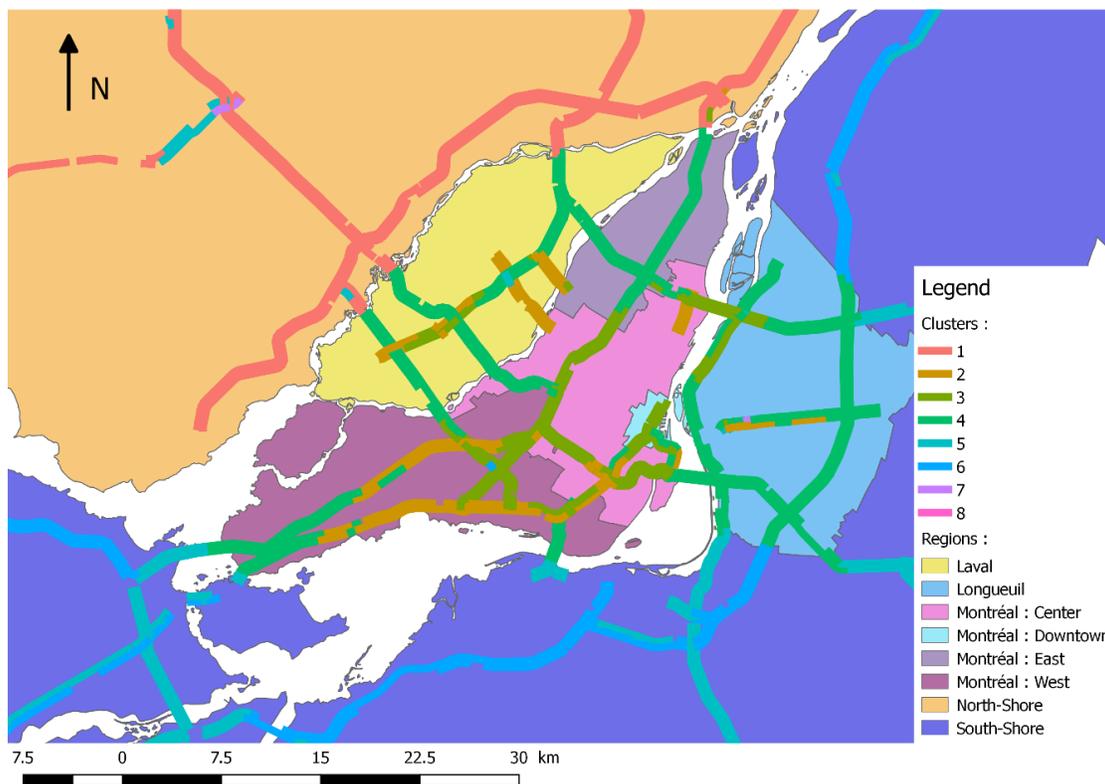


Figure 26. Distribution spatiale des différents types de segments routiers

Premièrement, il est intéressant de noter que les groupes créés sans prise en compte de la localisation spatiale présentent néanmoins certains corridors. Certains groupes comptent peu de segments et leur analyse sera moins pertinent. D'un point de vue géographique, deux principaux types d'agrégats peuvent être observés : ceux des territoires centraux (types 2, 3 et 4) et ceux des territoires périphériques (types 1, 5 et 6). Cependant, les deux couronnes rassemblent des types de segments différents, ce qui s'explique entre autres par la proportion de VUS qui est inférieure sur la couronne nord. De plus, Longueuil, Laval et les deux régions d'extrémité de Montréal ont des segments de mêmes types, confirmant le caractère moins urbain de ces territoires. En outre, le centre-ville est principalement cerné par des segments de type 3.

La distribution des différents types permet d'observer les éléments suivants :

- Le taux d'occupation des véhicules varie peu à travers les types mais est supérieur pour le type 6 ;
- Le pseudo taux d'utilisation des segments diffère pour les types 7 et 8 : ceux-ci ont un taux d'utilisation plus faible. Cependant, les segments de ce type sont principalement présents dans les territoires périphériques où la demande est moindre sur les liens – les résultats doivent donc être interprétés avec précaution.
- L'indicateur d'entropie permet d'identifier trois groupes de types de segments : ceux avec une forte entropie (types 1, 5 et 6) donc avec des usagers principalement locaux, le type 2 avec une entropie moyenne et les types avec une faible entropie donc des usages davantage métropolitains (types 3, 4 et 8).

La part de VUS sur les segments permet de différencier trois groupes : les types avec un faible pourcentage (types 2 et 3), très présents sur l'île de Montréal, les types avec une part moyenne (types 4, 6 et 7), observés dans les périphéries de l'île, Laval et Longueuil ainsi que la couronne sud, et le type avec un fort pourcentage (type 1) localisé principalement en couronne nord.

#### 2.7.5 Conclusion

Cette étude a proposé différentes vues de la circulation automobile sur les segments autoroutiers montréalais. Les données de l'enquête OD de 2013 ont permis d'analyser l'usage des différents segments à l'aide de quatre indicateurs : l'entropie de provenance des automobilistes, le pseudo taux d'utilisation des segments, le taux d'occupation et la part de VUS dans la circulation. Ces indicateurs ont ensuite permis de construire une typologie de segments pour mieux comprendre le rôle des infrastructures dans la mobilité automobile ainsi que les bénéficiaires et citoyens impactés par leur usage.

La suite des travaux porte sur le développement d'un indicateur de capacité globale d'accueil de véhicules (CGAV) pour différents territoires. L'objectif, à terme, est de pouvoir doter les décideurs d'indicateurs objectifs tenant compte des impacts négatifs de la circulation automobile tant d'un point de vue qualité de vie que de résilience environnementale.

## 2.8 Guide d'utilisation de Traclus-DL

- Par : Jean-Simon Bourdeau, Associé de recherche, travaux de Kinan Bahbouh et Yann Jeudy
- Contexte : Chaire Mobilité

### 2.8.1 Mise en contexte

Les logiciels et programmes informatiques sont des outils importants pour les professionnels en transport. Plusieurs des programmes qui sont créés par des étudiants ou des groupes de recherche sont souvent péniblement transférés aux professionnels en transports qui œuvrent dans des organismes publics ou en industrie. Un des logiciels qui a été développé par des étudiants de la Chaire Mobilité au cours des dernières années par Bahbouh (Bahbouh, 2016), puis amélioré par Jeudy (Jeudy, 2019), se nomme TraClus-DL. Il s'agit d'un programme qui permet d'identifier des corridors à partir de paires origine-destination. Dans un esprit d'accessibilité, le code source de TraClus-DL est disponible sur GitHub<sup>6</sup>. L'objectif du présent texte est de fournir des lignes directrices afin de pouvoir utiliser TraClus-DL de manière appropriée et efficace.

### 2.8.2 Utilisation de TraClus-DL

#### 2.8.2.1 Intrants

Pour utiliser TraClus-DL, il est nécessaire d'avoir un fichier texte au format csv contenant, pour chaque ligne, les informations suivantes:

1. Identification unique pour chaque ligne de désir (ID);
2. Poids de la ligne de désir (FEX) ou un facteur de pondération. En cas d'absence d'un facteur de pondération la valeur (1) doit être utilisée;
3. Coordonnée x d'origine (x\_o);
4. Coordonnée y d'origine (y\_o);
5. Coordonnée x de destination (x-d);
6. Coordonnée y de destination (y\_d).

La figure suivante montre un exemple de fichier qui contient 10 lignes de désir. Il ne doit pas y avoir d'entête au fichier, et les champs doivent être séparés par une tabulation (Tab). Autre point important, le fichier doit contenir des coordonnées en mètres, puisque plusieurs calculs de distances seront effectués avec les coordonnées.

|    |          |                     |                      |                     |                      |
|----|----------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| 1  | 35287.98 | 299494.028571428571 | 5040525.061003861004 | 299493.522007722008 | 5040542.942084942085 |
| 2  | 30093.48 | 299509.077578857630 | 5040578.867007672634 | 299591.561807331628 | 5040919.940323955669 |
| 3  | 11800.45 | 299485.681250000000 | 5040343.500000000000 | 298268.216666666667 | 5036439.183333333333 |
| 4  | 8177.34  | 299373.891737891738 | 5040377.792022792023 | 294842.672364672365 | 5036624.424501424501 |
| 5  | 15473.53 | 299417.683848797251 | 5040359.847079037801 | 295179.317869415808 | 5039511.620274914089 |
| 6  | 19935.95 | 299572.083333333333 | 5040751.936567164179 | 298486.268656716418 | 5043029.747512437811 |
| 7  | 16941.92 | 299569.337817638266 | 5040690.354260089686 | 295822.258594917788 | 5044505.131539611360 |
| 8  | 11744.29 | 299528.478170478170 | 5040583.750519750520 | 291780.898128898129 | 5045642.349272349272 |
| 9  | 4016.76  | 299563.496932515337 | 5040657.582822085890 | 296490.533742331288 | 5046955.404907975460 |
| 10 | 9973.95  | 299578.909930715935 | 5040664.390300230947 | 298944.494226327945 | 5046273.565819861432 |

Figure 27 Exemple de fichier texte au format csv en entrée pour TraClus-DL

Pour pouvoir exécuter TraClus-DL, les deux scripts Python suivants doivent se retrouver dans le même dossier :

- Traclus\_DL.py, qui contient des fonctions spatiales (*segments\_distance*, *segments\_intersect*, *point\_segment\_distance*, *closest\_point* et *sum\_pairwise*), ainsi que

<sup>6</sup> [https://github.com/kinanb/traclus\\_dl](https://github.com/kinanb/traclus_dl)

des fonctions pour la construction de corridors (*DBScan*, *add\_cluster*, *pop\_cluster* et *expand\_cluster*);

- *Trajectory.py*, qui contient les classes *Trajectory* et *TrajectorySegment*.

Ensuite, pour appeler TraClus-DL, on doit exécuter la commande suivante dans python :

```
python Traclus_DL.py filename max_distance min_density angle_max segment_length
```

où :

- *Traclus\_DL.py* est le fichier python contenant TraClus-DL;
- *filename* est le chemin (path) vers le fichier csv;
- *max\_distance* : largeur d'influence représentant la demi-largeur du corridor;
- *min\_density* : nombre minimal d'observations (ou poids de l'échantillon) requise pour créer un corridor;
- *angle\_max* : angle maximal permis entre le corridor principal et les lignes de désir;
- *segment\_length* : longueur de segmentation du corridor.

Par exemple, si on veut appeler TraClus-DL avec les paramètres suivants : *max\_distance* de 800, *min\_density* de 1000, *angle\_max* de 10 et *segment\_length* de 200, on fera l'appel suivant en ligne de commande :

```
python E:\CIV6702\traclus\Traclus_DL.py E:\CIV6702\traclus\od13_traclus.csv 800 1000 10 200
```

Dans cet exemple, le fichier qui contient TraClus-DL se trouve à cet endroit sur le disque : *E:\CIV6702\traclus\Traclus\_DL.py*, et le fichier texte au format csv se trouve à cet endroit sur le disque : *E:\CIV6702\traclus\od13\_traclus.csv*.

### 2.8.2.2 Résultats

Les résultats sont écrits dans deux fichiers, par exemple :

|   |                  |                      |          |
|---|------------------|----------------------|----------|
|  od13_traclus.csv                                      | 2020-01-20 14:06 | Fichier CSV Micro... | 10 Ko    |
|  od13_traclus.csv.800.0.1000.0.10.0.200.0_cor_list.csv | 2020-01-20 14:07 | Fichier CSV Micro... | 274 Ko   |
|  od13_traclus.csv.800.0.1000.0.10.0.200.0_seg_list.csv | 2020-01-20 14:07 | Fichier CSV Micro... | 1 193 Ko |

Le premier fichier contient la liste des corridors (*od13\_traclus.csv.800.0.1000.0.10.0.200.0\_cor\_list.csv*) tandis que le second fichier contient la liste de segments ou paires OD (*od13\_traclus.csv.800.0.1000.0.10.0.200.0\_seg\_list.csv*). Pour les fichiers de résultats, les noms des fichiers contiennent les trois informations suivantes :

1. Le nom du fichier csv d'entrée (par exemple *od13\_traclus.csv*);
2. Les paramètres de création de corridors, dans l'ordre la distance maximale, le nombre minimal d'observations, l'angle maximal permis et la longueur de segmentation du corridor (dans cet exemple respectivement 800 mètres, 1000, 10 degrés et 200 mètres);
3. La dernière partie du nom du fichier (*\_cor\_list* ou *\_seg\_list*) sert à déterminer si le fichier contient la liste de corridors qui ont été créés avec les critères choisis, ou la liste de segments d'entrée (ainsi que l'appartenance du segment à un corridor, le cas échéant).

Le fichier de corridors contient les champs suivants :

1. *cor\_id* : identifiant unique du corridor;

2. cor\_weight : la somme des poids de tous les segments appartenant au corridor;
3. cor\_coordinates : les coordonnées, au format *Well known text* (WKT) de type LINESTRING, du corridor.

Le fichier de segments contient les champs suivants :

1. dl\_id : identifiant unique du segment;
2. dl\_weight : poids du segment;
3. dl\_angle : angle, en degrés, du segment;
4. cor\_id : Corridor auquel le segment a été associé. Si le segment n'est pas associé à aucun corridor, la valeur de cor\_id sera -1;
5. seg\_coordinates : les coordonnées, au format *Well known text* (WKT) de type LINESTRING, du corridor.

Il est possible d'importer ces deux fichiers dans un SIG, par exemple QGIS, tel qu'illustré à la Figure 28. Il faut cependant faire attention aux éléments suivants lors de l'importation :

- Dans le *format de fichier*, il faut indiquer que le séparateur est personnalisé, et de type *Tab*;
- Dans la *définition de la géométrie*, il faut indiquer que le champ de géométrie se nomme *seg\_coordinates*, et qu'il est au format *Well known text* (WKT). Le SCR de la géométrie peut varier selon les coordonnées qui sont fournies dans le fichier texte d'entrée. Dans l'exemple ici les coordonnées étaient dans le SCR 32188 (MTM zone 8).

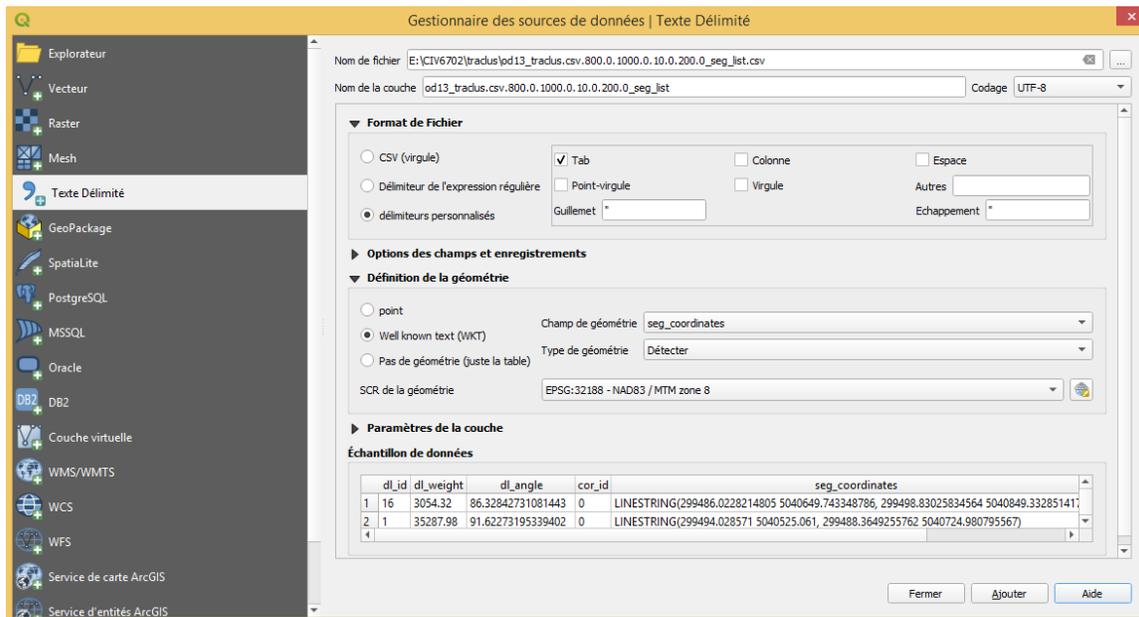


Figure 28 Exemple d'importation des fichiers de résultats de TraClus-DL dans QGIS

La Figure 29 montre l'affiche des segments et des corridors dans QGIS. Les segments qui appartiennent à un corridor sont rouges et en pointillé, tandis que ceux qui n'appartiennent pas à un corridor (id\_cor = -1) sont en gris pâle. Les corridors sont quant à eux dessinés avec des lignes noires et grasses.

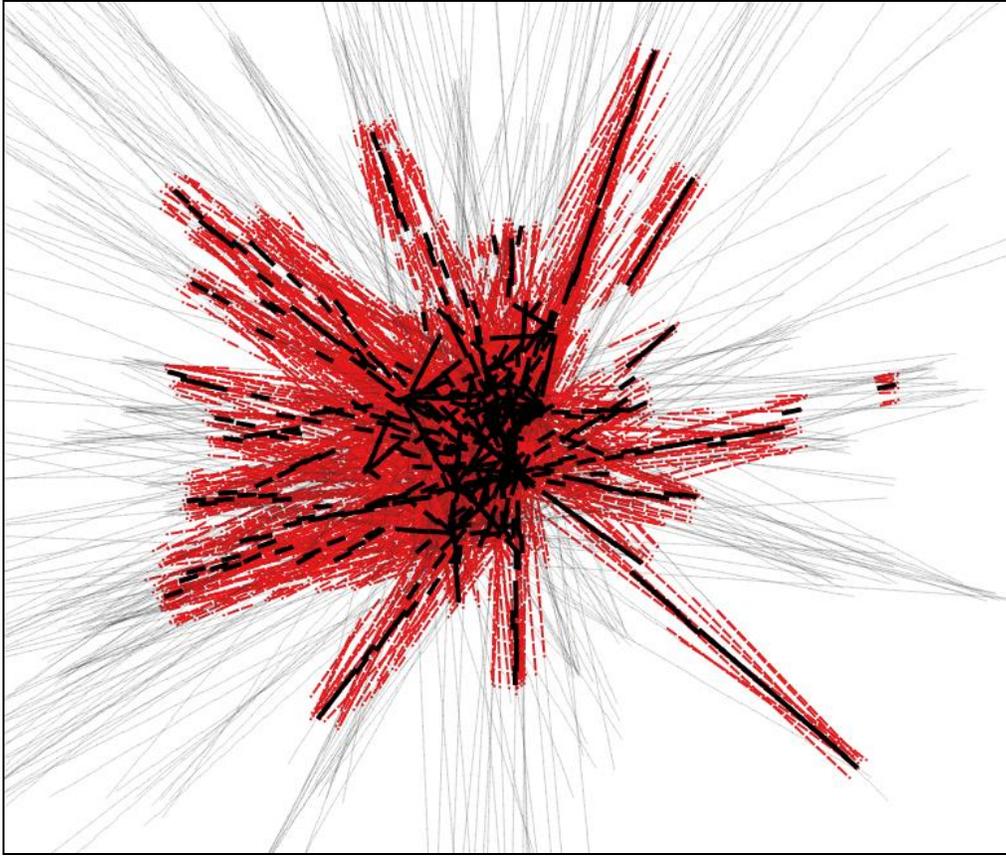


Figure 29 Exemple d’affichage des corridors (lignes noires et grasses) et des segments (lignes étroites)

### 2.8.3 Analyse du temps d’exécution de TraClus-DL

Une analyse de sensibilité du temps d’exécution du programme TraClus-DL a été effectuée. Pour chaque exécution, les quatre paramètres de création de corridors étaient les mêmes, et le seul élément qui a varié est le fichier texte d’entrée (*E:\CIV6702\traclus\od13\_traclus.csv*), pour lequel le nombre d’observations a varié. Le fichier texte d’entrée contient, pour chaque exécution, un échantillon aléatoire de paires OD agrégées au centroïde du secteur municipal. Les paramètres qui ont été utilisés sont les suivants :

```
λ python E:\CIV6702\traclus\Traclus_DL_sensibilite.py E:\CIV6702\traclus\od13_traclus.csv 1000 5000 10 1000
```

L’évolution du temps de calcul en fonction du nombre de lignes de désir en entrée a été mise dans un graphique et est présentée à la Figure 30. Une courbe de tendance a été ajoutée sur la Figure 4 et montre que le temps d’exécution du programme TraClus-DL en fonction du nombre de lignes de désir suit une courbe polynomiale de degré 2.

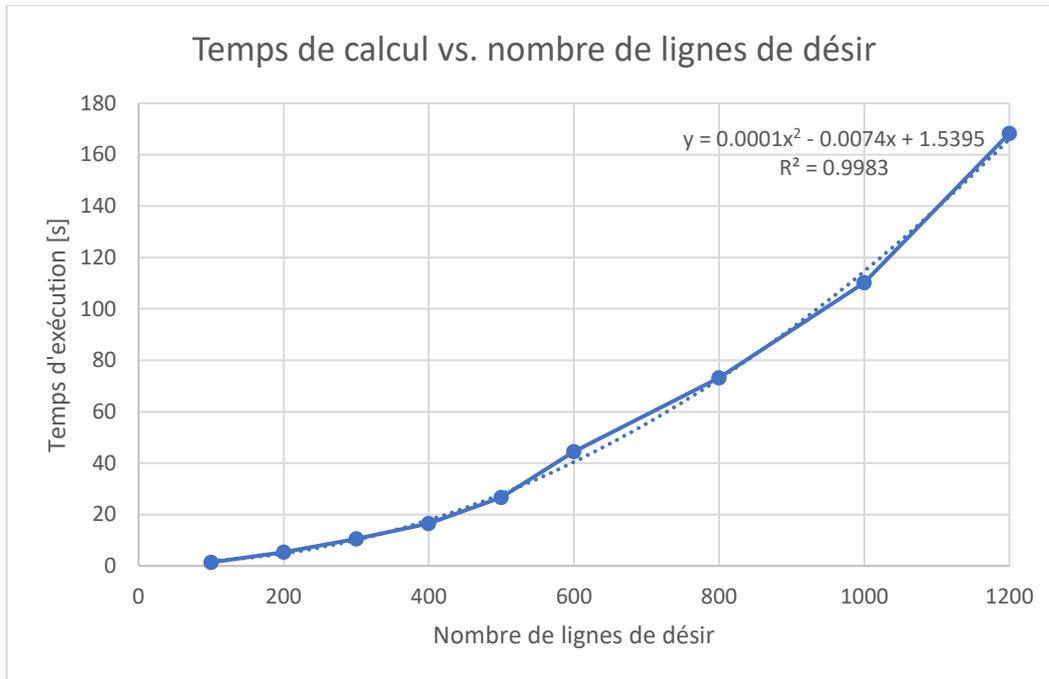


Figure 30 Temps d'exécution du programme TraClus-DL en fonction du nombre de lignes de désir

```
λ python E:\CIV6702\traclus\Traclus_DL_sensibilite.py E:\CIV6702\traclus\od13_traclus_5001.csv 3000 5000 10 1000
```

Ensuite, afin d'estimer l'effet qu'on chacun des quatre paramètres d'entrée sur le temps d'exécution de TraClus-DL, une analyse de sensibilité a été faite en ne faisant varier qu'un seul paramètre à la fois. Pour chaque exécution, le même jeu de 500 segments a été utilisé. Le premier paramètre, la largeur d'influence, est présenté à la Figure 31. La largeur d'influence a un impact significatif sur le temps d'exécution, dans l'exemple ici celui-ci passe de moins de 15 secondes à plus de 90 secondes, une augmentation de plus de 600 %. Le temps d'exécution semble se stabiliser après un certain seuil de largeur, ici environ 6000 mètres. Ce seuil de stabilisation variera selon la densité et l'étendue des segments fournis en entrée. Il pourra aussi varier selon les modes étudiés, de quelques centaines de mètres pour les modes actifs à plusieurs kilomètres pour les modes motorisés (Bahbouh, 2015).

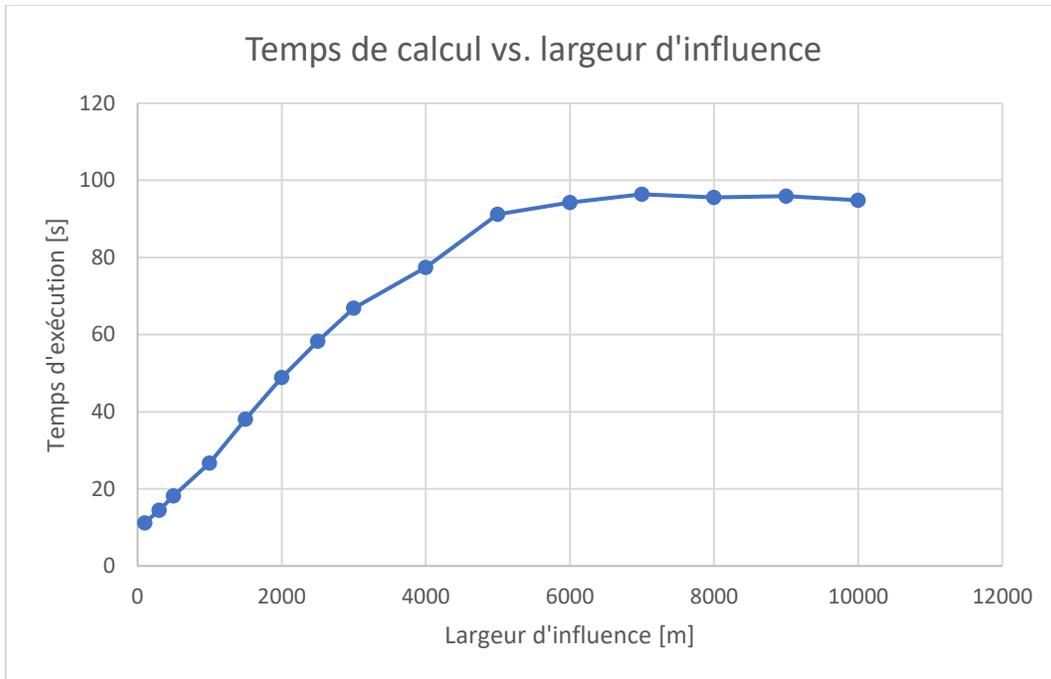


Figure 31 Temps d'exécution du programme TraClus-DL en fonction de la largeur d'influence (*max\_distance*)

Le deuxième paramètre, l'angle maximal, est présenté à la Figure 32. Le temps d'exécution augmente de manière assez proportionnelle avec une augmentation de l'angle maximal, ce qui est normal puisque plus la différence d'angle acceptée est grande et plus le nombre de segments qui seront ajoutés à un même corridor augmentera. Dans un article, Bahbouh (Bahbouh, 2015) a statué que l'angle entre deux segments du même corridor ne devrait jamais dépasser 45 degrés. Ainsi, l'angle maximal doit être inférieur à 22.5 degrés.

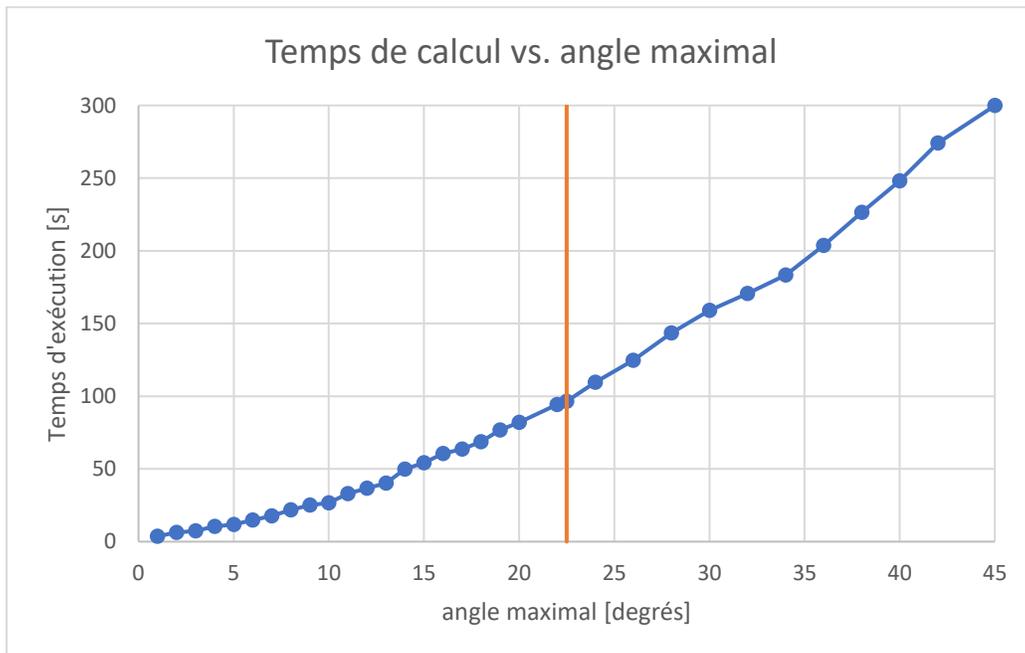


Figure 32 Temps d'exécution du programme TraClus-DL en fonction de l'angle maximal (*angle\_max*)

Le troisième paramètre, le nombre minimal d'observations, est présenté à la Figure 33. Ici, plus le nombre minimal d'observations requis pour former un corridor augmente, plus le temps de calcul diminuera, puisque moins de corridors seront formés. La diminution du temps de calcul est plus prononcée lorsque le nombre minimal d'observations est beaucoup trop faible, ici moins de 2000 observations. Par la suite, le taux de diminution du temps d'exécution va de manière décroissante. Ici, dans l'échantillon de 500 segments qui a été utilisé, le poids médian par segment est de 552. D'après ces résultats, afin de minimiser le temps de calcul, le nombre minimal d'observations devrait être supérieur à quatre fois le poids médian des segments.

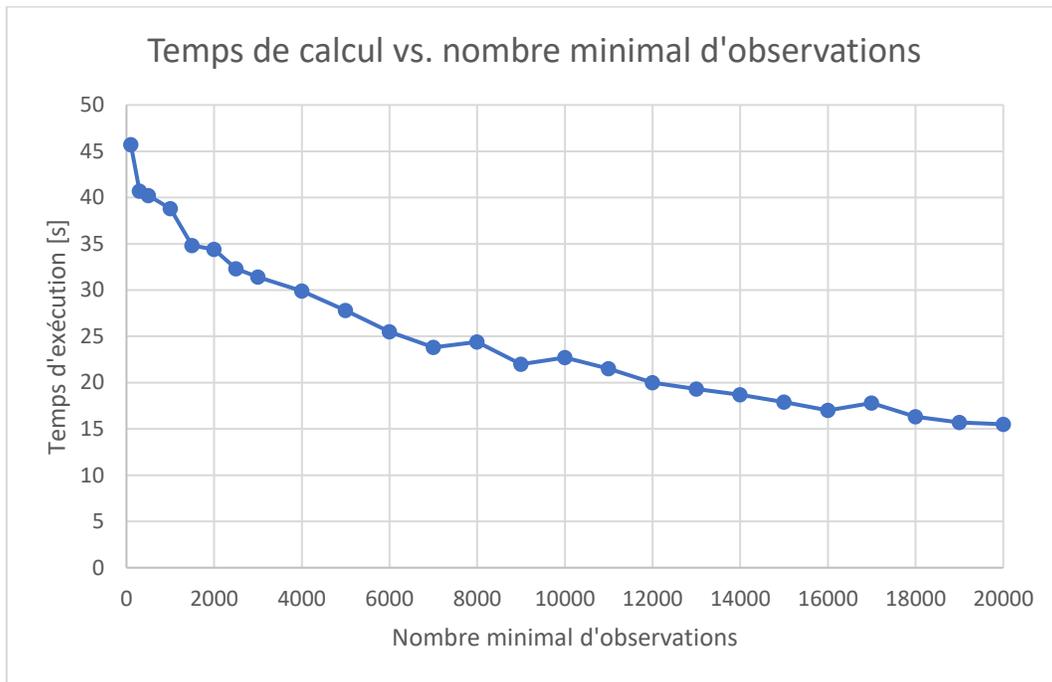


Figure 33 Temps d'exécution du programme TraClus-DL en fonction du nombre minimal d'observations (*min\_density*)

Le quatrième paramètre, la longueur de segmentation, est présenté à la Figure 34. Ici aussi, plus la longueur de segmentation augmente, plus le temps d'exécution diminue. Le taux de diminution du temps d'exécution est aussi beaucoup plus important pour des faibles longueurs de segmentation. Ici, dans l'échantillon de 500 segments qui a été utilisé, la longueur médiane des segments est d'un peu plus de 18 000 mètres. D'après ces résultats, afin de minimiser le temps de calcul, la longueur minimale de segmentation devrait être supérieure à 5 % de la longueur médiane des segments (ici 900 mètres). De plus, le temps d'exécution varie peu pour une longueur de segmentation supérieure à 20 % de la longueur médiane des segments (ici 3600 mètres).

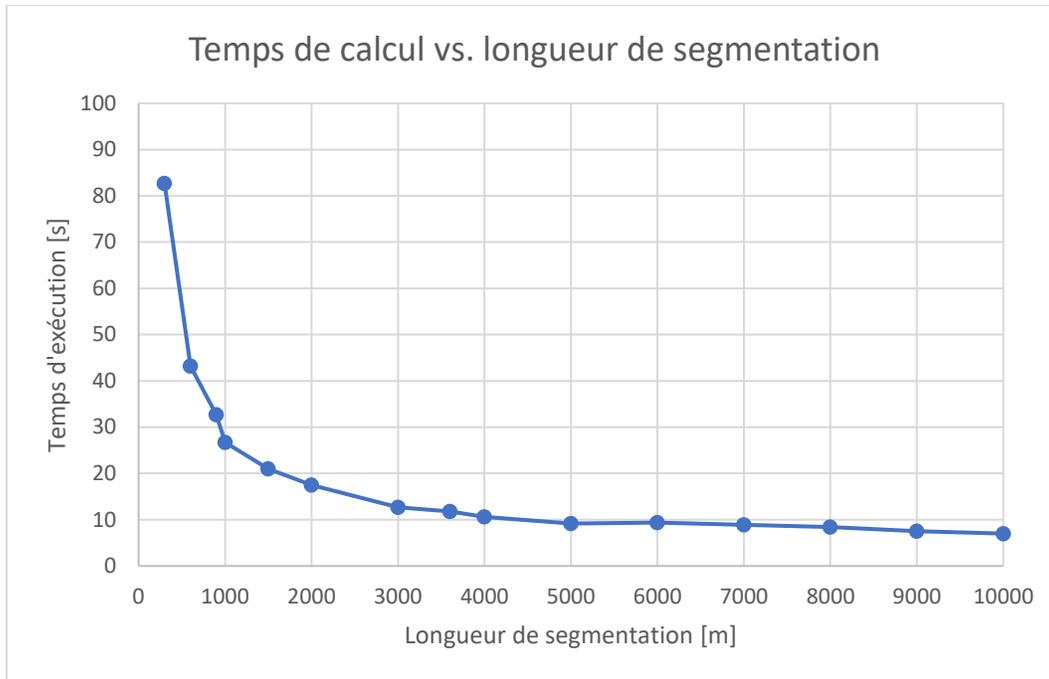


Figure 34 Temps d'exécution du programme TraClus-DL en fonction de la longueur de segmentation (*segmentation\_length*)

#### 2.8.4 Choix des paramètres de TraClus-DL

La Figure 35 illustre le schéma décisionnel pour le choix des paramètres de TraClus-DL, toujours dans une optique de minimisation du temps d'exécution. La première étape consiste à se demander si le nombre de segments peut être réduit, c'est-à-dire si la taille du problème peut être diminuée. Cela peut être fait par exemple en segmentant les déplacements sur une base temporelle, modale et/ou spatiale. La deuxième étape consiste à se demander si l'angle maximal est inférieur à 22.5 et si oui s'il peut encore être réduit. Un angle trop faible va associer moins de segments à un corridor, alors qu'un angle trop élevé va associer des segments moins similaires à un même corridor. Ensuite, la largeur d'influence peut être réduite, selon le ou les modes étudiés. Le nombre minimal d'observation devrait être au moins supérieur à quatre fois le poids médian des segments afin de minimiser le temps d'exécution. Finalement, la longueur de segmentation devrait être comprise entre 5 % et 20 % de la longueur médiane des segments, tant qu'elle ne dépasse pas la largeur d'influence (Bahbouh, 2015).

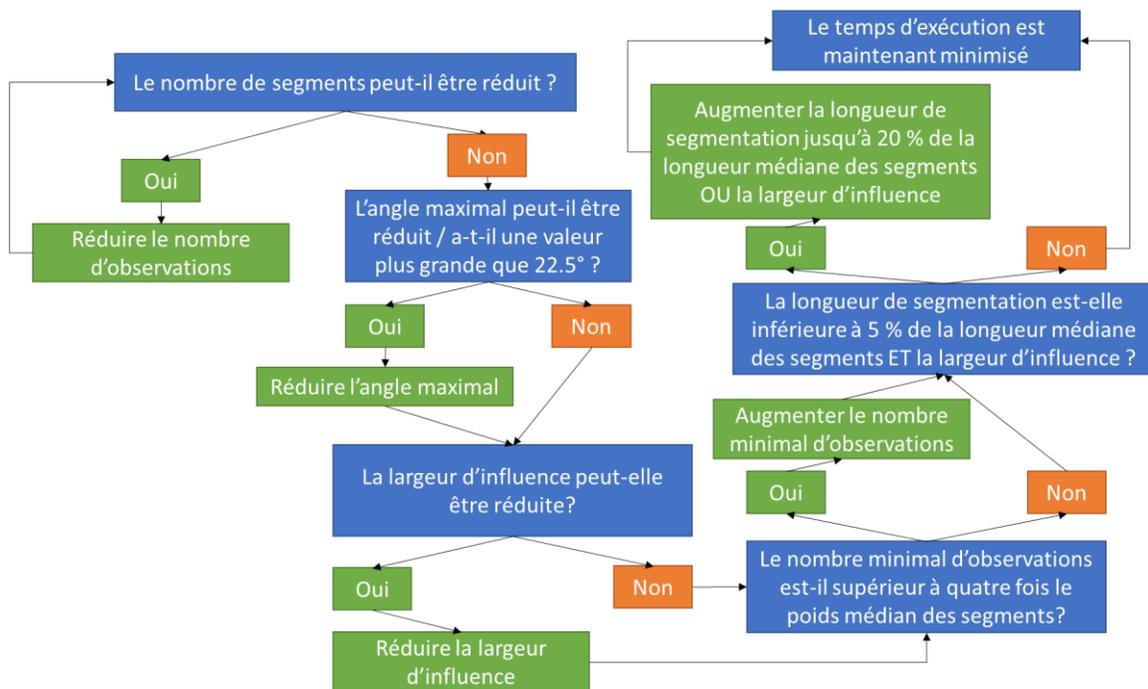


Figure 35 Schéma décisionnel pour le choix des paramètres du programme TraClus-DL

### 2.8.5 Perspectives

En conclusion, TraClus-DL est un programme ouvert et accessible pour les professionnels. Il est toutefois important de bien comprendre les paramètres d'entrée et leurs impacts respectifs sur les temps d'exécution, ce que ce guide fait. Il y a toutefois plusieurs améliorations qui pourraient être apportés à TraClus-DL, notamment une optimisation du code. Ainsi, plusieurs fonctions spatiales sont imbriquées dans le programme. Une utilisation de fonctions spatiales existantes et optimisées, par exemple l'extension spatiale PostGIS du système de gestion de bases de données PostgreSQL ou l'utilisation du module GeoPandas dans le langage Python, permettraient probablement de réduire le temps d'exécution de TraClus-DL.

## 2.9 Calibration des temps de parcours de lignes de bus

- Par : Pierre-Léo Bourbonnais, Associé de recherche
- Contexte : Chaire Mobilité

### 2.9.1 Introduction

Dans plusieurs projets de conception ou d'optimisation de réseaux de transport collectif, des lignes de bus doivent être générées ou modifiées. Pour obtenir des trajets et des horaires réalistes, une calibration des temps de parcours des calculateurs de chemin pour les bus doit d'abord être réalisée. D'autre part, les temps d'arrêts doivent être estimés selon différents scénarios puisque ces temps représentent une portion appréciable du temps de parcours global d'une ligne.

Pour obtenir des temps de parcours sur chaque segment du réseau routier utilisé par les bus dans la région de Montréal, une comparaison a d'abord été effectuée entre les temps planifiés des lignes existantes du RTL en pointe du matin (départs les plus proches de 8:00) et les temps de parcours entre les deux terminus en voiture selon les données optimistes et pessimistes de Google. Le temps planifié par le RTL d'un terminus à l'autre est ainsi comparé à la moyenne du temps de parcours obtenu de Google pour un jeudi du mois de mai 2019. Cette comparaison a également été évaluée pour d'autres réseaux dans le monde, notamment les réseaux de bus de Lausanne (TL), Paris (RATP), Montréal (STM), Stockholm (SL), Toronto (TTC) et Portland, Oregon (TriMET). Grâce à ces comparaisons, il a été possible de déterminer de quelle manière il est possible d'obtenir un temps de parcours réaliste pour une ligne de bus en ajoutant des temps d'arrêt à la moyenne du temps prévu en voiture pour le même trajet, le tout en tenant compte des voies réservées, qui permettent de limiter la variabilité des temps de parcours des bus. Éventuellement, l'analyse sera également réalisée avec d'autres réseaux de la région de Montréal pour obtenir un portrait plus général.

### 2.9.2 Analyse comparative des temps de parcours des lignes de bus de différents réseaux

---

L'analyse comparative permet de mettre en lumière les différences sur le plan du temps de parcours planifié de plusieurs réseaux de bus. Pour ce faire, les temps planifiés obtenus au moyen des données GTFS sont comparés à la variabilité des temps de parcours en voiture obtenus de Google (données historiques sous congestion) en pointe du matin (départs à 8:00).

Pour obtenir la variabilité des temps de parcours sous congestion, on utilise le calculateur de chemin de Google en ajoutant des points de repère sur le trajet le plus rapide entre les terminus afin d'obtenir le trajet exact emprunté par les bus sur les différentes lignes du réseau étudié. On fixe l'heure de départ à 8:00, pour un jeudi du mois de mai 2019. Une fois le calcul lancé, on obtient un temps de parcours optimiste et un temps pessimiste, ce qui nous donne une plage de temps de parcours. On conserve alors le temps minimum (optimiste, très proche de l'écoulement libre : 0%), le temps maximum (pessimiste : 100%), ainsi que la moyenne entre les deux (que l'on appellera 50%). La Figure 36 montre une capture d'écran de la procédure d'obtention de la plage de temps sous congestion au moyen de Google. On sélectionne ensuite le temps de parcours planifié du trajet dont le départ est le plus près de 8:00 en utilisant les données GTFS des horaires planifiés. Ce temps planifié est ensuite inséré dans l'intervalle obtenu de Google, ce qui donne un pourcentage. Si une voie réservée est présente sur le parcours de la ligne étudiée, on prend pour acquis que le bus peut circuler en utilisant le temps optimiste sur la section du trajet en voie réservée et on compare donc la plage de temps de Google seulement avec le temps de parcours

planifié sur les sections sans voie réservée. Par ailleurs, les autres mesures préférentielles comme les feux chandelle ou les priorités aux bus ont été négligées faute de données exhaustives et précises pour la plupart des villes étudiées.

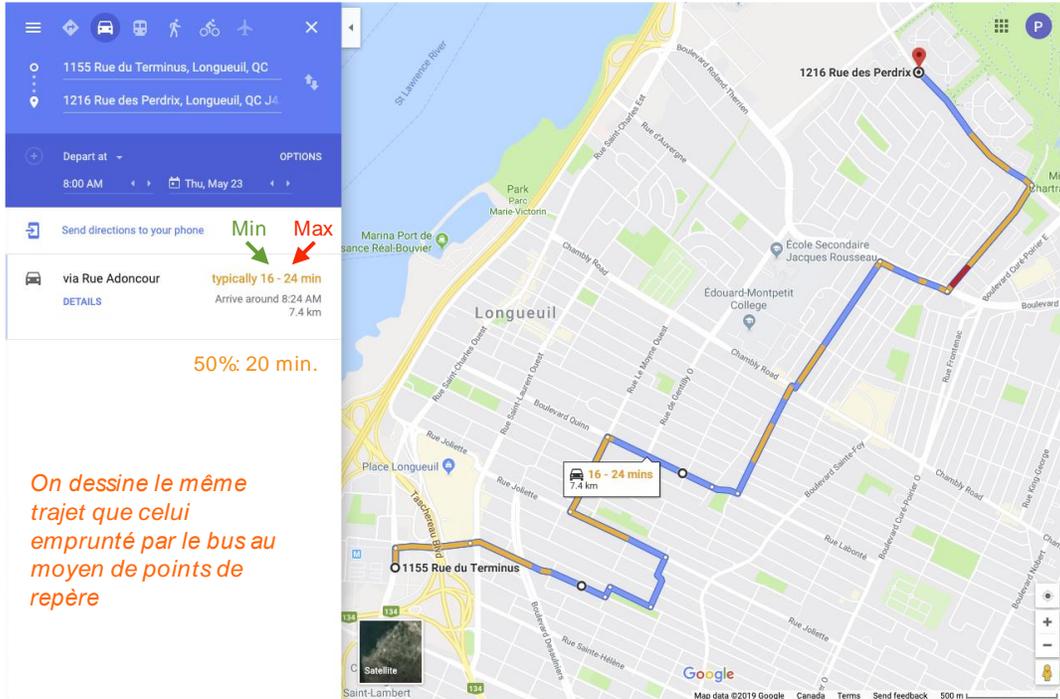


Figure 36. Obtention des plages de temps sous congestion pour un trajet de ligne de bus au moyen des données de Google

Les résultats pour chaque ville sont présentés d’abord dans la Figure 37. Il est important de noter que les pourcentages obtenus sont la moyenne pour toutes les lignes de bus du réseau du côté du RTL et du TL Lausanne, alors qu’un échantillon de lignes de bus dans le réseau a été étudié pour les autres villes (RATP, SL Stockholm, TriMET, STM et TTC). Cet échantillon compte entre 8 et 20 lignes par ville, sélectionnées de manière aléatoire.

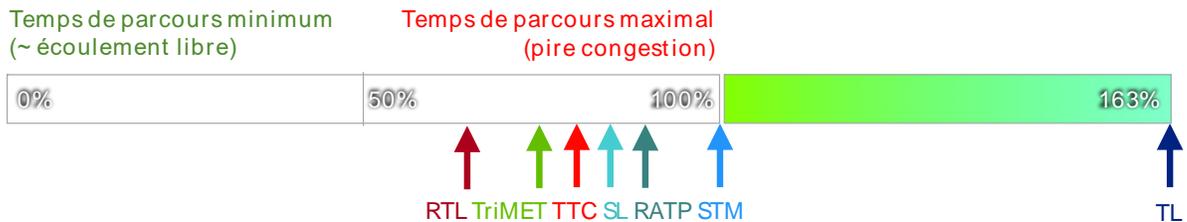


Figure 37. Temps planifiés par rapport aux temps en voiture (même parcours sans tenir compte des temps d’arrêt)

On remarque que seul le réseau de bus de Lausanne se donne une marge de manœuvre de plus de 100%, c’est-à-dire qu’en moyenne à Lausanne, les temps planifiés sont 163% plus longs que les temps de parcours pessimiste obtenu de Google. Le RTL est le réseau pour lequel le pourcentage est le plus faible à 65% en moyenne. Si l’on ajoute des temps de 8 secondes<sup>7</sup> par d’arrêt à la plage

<sup>7</sup> 8 secondes est le minimum de temps d’arrêt nécessaire pour faire monter une seule personne à bord d’un bus

de temps de Google (Figure 38), on obtient des pourcentages plus faibles (entre 28% pour le RTL et 119% pour TL Lausanne). Dans la littérature, on indique qu'un temps d'arrêt de 20 secondes en moyenne doit être planifié pour faire face aux imprévus et à la forte demande en période de pointe. Or, si l'on tient compte de cet indication (Figure 39), on obtient alors des pourcentages entre -8% (RTL) et 65% (RATP).

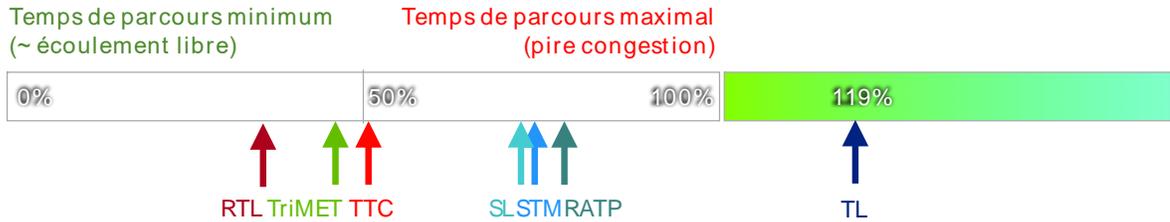


Figure 38. Temps planifiés par rapport aux temps en voiture (même parcours avec 8 secondes ajoutées par arrêt)



Figure 39. Temps planifiés par rapport aux temps en voiture (même parcours avec 20 secondes ajoutées par arrêt)

Avec les résultats obtenus, on peut également mesurer le temps prévu par arrêt lorsque le niveau de congestion est à 50%. La Figure 40 montre qu'au RTL, lorsque le niveau de congestion est moyen, le temps d'arrêt moyen serait négatif (environ -4 secondes), ce qui implique que des retards sont inévitables même lorsque la congestion est proche de la moyenne.

---

avec un confort adéquat.

### Temps d'arrêt équivalent pour un temps de parcours avec congestion moyenne (50%)

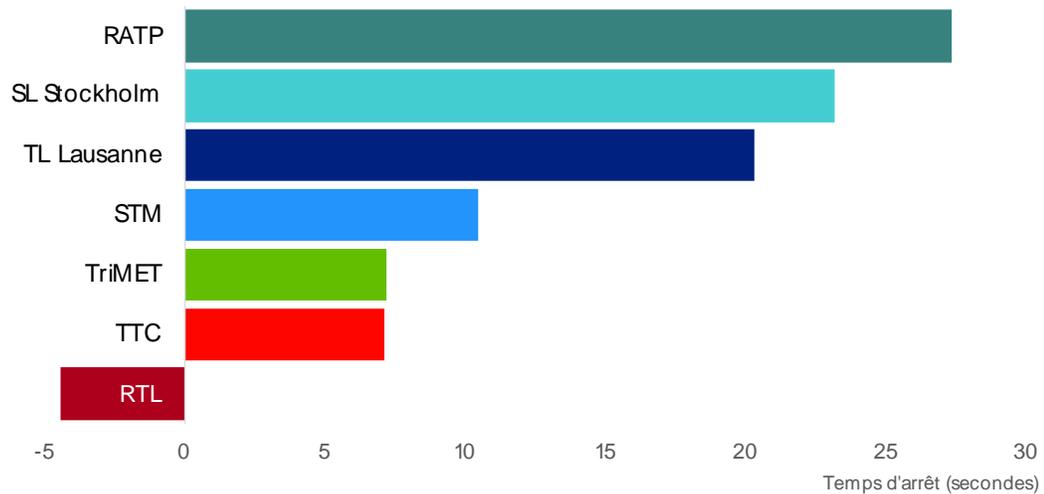


Figure 40. Temps d'arrêt équivalent pour un temps de parcours avec congestion moyenne (50%)

### 2.9.3 Conclusions et limitations

De manière générale, on remarque que les réseaux européens se donnent une plus grande marge de manœuvre pour faire face aux délais imprévus et à la congestion. Toutefois, il serait judicieux de poursuivre l'analyse avec d'autres villes d'ailleurs dans le monde, avec de plus grands échantillons de lignes. Le petit nombre de réseaux et de lignes étudiés dans le cadre de ce projet de recherche est dû au travail manuel considérable nécessaire pour colliger et comparer les temps de parcours, notamment en ce qui a trait aux parcours réels sur les réseaux routiers. En effet, ceux-ci doivent souvent être vérifiés et validés, car les données GTFS ne contiennent pas toujours les bons trajets (la plupart ne comportent que des séquences d'arrêts, ce qui amène une longue recherche pour obtenir les parcours réels à partir d'autres sources de données moins accessibles).

## 3 Rayonnement

### 3.1 Publications (2020)

### 3.2 Principales participations à des congrès

#### 3.2.1 Congrès annuel du Transportation research board 2020

.

#### 3.2.2 Congrès annuel de l'Association québécoise des transports 2019

**IMPORTANT – annulé effet COVID**

#### 3.2.3 2e Rencontres Francophones Transport Mobilité 2019 - Montréal

Chabin, V., Saunier, N., Morency, C. (2019). Caractérisation des typologies d'utilisateurs d'un service de taxis électriques, 2<sup>e</sup> rencontres francophones transport mobilité, Montréal.

Verreault, H., Morency, C. (2019). Enquête Origine-Destination 2018 de la région de Montréal : Le casse-tête de l'échantillonnage à bases multiples, 2<sup>e</sup> rencontres francophones transport mobilité, Montréal.

Mageau-Béland, J., Morency, C. (2019). Composition et exposition sociale dynamique : étude du cas de Montréal, 2<sup>e</sup> rencontres francophones transport mobilité, Montréal.

Bourdeau, J.-S., Morency, C. (2019). Arbres de choix modal utilisant les ratios de compétitivité, 2<sup>e</sup> rencontres francophones transport mobilité, Montréal.

Lepage, S., Morency, C. (2019). Impact des événements atypiques sur la demande de transport, 2<sup>e</sup> rencontres francophones transport mobilité, Montréal.

Jeudy, Y., Morency, C. (2019). Outil d'aide au diagnostic et à la conception d'offres de transport collectif, 2<sup>e</sup> rencontres francophones transport mobilité, Montréal.

Lefebvre-Ropars, G., Morency, C., Negron-Poblete, P. (2019). Analyse automatisée du partage spatiotemporel des rues de Montréal, 2<sup>e</sup> rencontres francophones transport mobilité, Montréal.

Michaud, C., Morency, C., Boisjoly, G. (2019). Évaluer l'équité d'une offre de transport collectif: une question d'accessibilité!, 2<sup>e</sup> rencontres francophones transport mobilité, Montréal.

Khachman, M., Morency, C. (2019). Synthétisation de la population et de sa mobilité, 2<sup>e</sup> rencontres francophones transport mobilité, Montréal.

Deschaintres, E., Morency, C., Trépanier, M. (2019). La courbe enveloppe de la mobilité totale et multimodale : une étude longitudinale et comparative entre une enquête ménage régionale et la fusion de données passives, 2<sup>e</sup> rencontres francophones transport mobilité, Montréal.

Lavolette, J., Morency, C., Gousse-Lessard, A.-S. (2019). Mobilité et style de vie : à quoi aspirent les jeunes ?, 2<sup>e</sup> rencontres francophones transport mobilité, Montréal.

Milord, B., Bourdeau, J.-S., Morency, C. (2019). Revue des pratiques internationales récentes pour la gestion du stationnement, 2<sup>e</sup> rencontres francophones transport mobilité, Montréal.

#### 3.2.4 Autres présentations

Menoire, M., Wielinski, G., Morency, C., Trépanier, M. (2019). Predicting car sharing station-based trip generation using a growth model, 15th World Conference on Transport Research, Mumbai, India.

Morency, C. (2019). Réfléchir l'électrification dans le contexte global des défis de mobilité, Atelier « Électrifier nos transports : on s'arrête ou on continue? », Assises de l'Union des municipalités du Québec, Québec, Mai 2019.

Morency, C. (2019). Pour une mobilité plus durable: comment inverser les tendances?, Déjeuner techno de Jalon Montréal, novembre 2019.

Morency, C. (2019). Solutions pour réduire la pollution atmosphérique liée aux transport, Santé et qualité de l'air : enjeu de société majeur, Mars 2019.

Morency, C. (2019). Mobilité urbaine: constats et stratégies, Colloque Air, Changements climatiques et Énergie 2019 | Québec.

Morency, C. (2019). Transport et mobilité: Constats et perspectives pour alimenter la prise de décisions, Forum sur les politiques de transport collectif de l'ACTU, Polytechnique Montréal, 4 octobre 2019.

Morency, C. (2019). Pour une mobilité plus durable: Comment inverser les tendances?, Conférence Où s'en va la mobilité durable? HEC, Septembre 2019.

## 4 Références

- Andre, M. (2004). The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions. *Science of the Total Environment*, 2004. 334-335: 73-84.
- Anowar, S., Eluru, N., & Miranda-Moreno, L. F. (2014). Alternative Modeling Approaches Used for Examining Automobile Ownership: A Comprehensive Review. *Transport Reviews*, 34(4), 441-473. doi:10.1080/01441647.2014.915440
- Anowar, S., Eluru, N., & Miranda-Moreno, L. F. (2016). Analysis of vehicle ownership evolution in Montreal, Canada using pseudo panel analysis. *Transportation*, 43(3), 531-548. doi:10.1007/s11116-015-9588-z
- Anowar, S., Yasmin, S., Eluru, N., & Miranda-Moreno, L. F. (2014). Analyzing car ownership in Quebec City: a comparison of traditional and latent class ordered and unordered models. *Transportation*, 41(5), 1013-1039. doi:10.1007/s11116-014-9522-9
- Ashtari, A., E. Bibeau, Shahidinejad, S. (2014). Using Large Driving Record Samples and a Stochastic Approach for Real-World Driving Cycle Construction: Winnipeg Driving Cycle. *Transportation Science*, 2014. 48: 170–183.
- Bamberg, S., & Rees, J. (2017). The impact of voluntary travel behavior change measures – A meta-analytical comparison of quasi-experimental and experimental evidence. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 100, 16-26. doi:https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.04.004
- Barthélemy, M., & Flammini, A. (2009). Co-evolution of density and topology in a simple model of city formation. *Networks and Spatial Economics*, 2009, 9, 401 - 425.
- Bayart, C., Bonnel, P., & Morency, C. (2009). Survey mode integration and data fusion: methods and challenges. Dans P. Bonnel, M. Lee-Gosselin, J. Zmud, & J.-L. Madre (édit.), *Transport survey methods: Keeping up with a changing world* (p. 587-611): Emerald Group Publishing Limited.
- Becker, H., Loder, A., Schmid, B., & Axhausen, K. W. (2017). Modeling car-sharing membership as a mobility tool: A multivariate Probit approach with latent variables. *Travel Behaviour and Society*, 8, 26-36. doi:10.1016/j.tbs.2017.04.006
- Bhat, C. R., & Eluru, N. (2009). A copula-based approach to accommodate residential self-selection effects in travel behavior modeling. *Transportation Research Part B: Methodological*, 43(7), 749-765. doi:10.1016/j.trb.2009.02.001
- Bhat, C. R., & Guo, J. Y. (2007). A comprehensive analysis of built environment characteristics on household residential choice and auto ownership levels. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41(5), 506-526. doi:https://doi.org/10.1016/j.trb.2005.12.005
- Bhat, C. R., & Pulugurta, V. (1998). A comparison of two alternative behavioral choice mechanisms for household auto ownership decisions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 32(1), 61-75. doi:https://doi.org/10.1016/S0191-2615(97)00014-3
- Bhat, C. R., & Sen, S. (2006). Household vehicle type holdings and usage: an application of the multiple discrete-continuous extreme value (MDCEV) model. *Transportation Research Part B: Methodological*, 40(1), 35-53. doi:10.1016/j.trb.2005.01.003
- Bhat, C. R., Sen, S., & Eluru, N. (2009). The impact of demographics, built environment attributes, vehicle characteristics, and gasoline prices on household vehicle holdings and use. *Transportation Research Part B: Methodological*, 43(1), 1-18. doi:10.1016/j.trb.2008.06.009

- Biswas, S., Chakraborty, S., Chandra, S., Ghosh, I., (2016). Kriging based approach for estimation of vehicular speed and passenger car units on an urban arterial. *J., Transp. Eng. Part A Syst.*, 2016.
- Björklund, G., & Swärdh, J.-E. (2017, Décembre). Estimating policy values for in-vehicle comfort and crowding reduction in local public transport. *Transportation Research Part A*, pp. 453-472.
- Buehler, R., & Hamre, A. (2014). An examination of recent trends in multimodal travel behavior among American motorists. *International Journal of Sustainable Transportation*, 10(4), 354-364. doi:10.1080/15568318.2014.945672
- Cao, X., Mokhtarian, P. L., & Handy, S. L. (2007). Cross-Sectional and Quasi-Panel Explorations of the Connection between the Built Environment and Auto Ownership. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 39(4), 830-847. doi:10.1068/a37437
- Castanedo, F. (2013). A Review of Data Fusion Techniques. *Scientific World Journal*. doi:10.1155/2013/704504
- Caulfield, B. (2011). Identifying the characteristics of households with multiple car ownership. Communication présentée à Transportation Research Board 90th Annual Meeting.
- Cherchi, E., & Bhat, C. (2018). Workshop Synthesis: Data analytics and fusion in a world of multiple sensing and information capture mechanisms. *Transportation Research Procedia*, 32, 416-420. doi:10.1016/j.trpro.2018.10.059
- Chin, H.-C., Pang, X., & Wang, Z. (2019). Analysis of Bus Ride Comfort Using Smartphone Sensor Data. *Computers, Materials & Continua*, 455-463.
- Clark, S. D. (2007). Estimating local car ownership models. *Journal of Transport Geography*, 15(3), 184-197. doi:https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2006.02.014
- Colville-Andersen, M. (2018). *Copenhagenize: the definitive guide to global bicycle urbanism*. Washington, DC, United States : Island Press.
- Communauté métropolitaine de Montréal. (2018). Perspective Grand Montréal n°35 - Déplacements domicile-travail dans le Grand Montréal : Faible progression du transport durable depuis 2001. Tiré de [http://cmm.qc.ca/fileadmin/user\\_upload/periodique/35\\_Perspective.pdf?utm\\_source=Communiqu%C3%A9%20site&utm\\_medium=18%20f%C3%A9vrier%202018&utm\\_campaign=Perspective](http://cmm.qc.ca/fileadmin/user_upload/periodique/35_Perspective.pdf?utm_source=Communiqu%C3%A9%20site&utm_medium=18%20f%C3%A9vrier%202018&utm_campaign=Perspective)
- Cox, T., Houdmont, J., & Griffiths, A. (2006). Rail passenger crowding, stress, health and safety in Britain. *Transportation Research Part A*, 244-258.
- Currie, G., Richardson, T., Smyth, P., Vella-Broderick, D., Hine, J., Lucas, K., Stanley, J., Morris, J., Kinnear, R., Stanley, J. (2009). Investigating links between transport disadvantage, social exclusion and well-being in Melbourne—Preliminary Results, *Transport Policy Special Issue International Perspectives on Transport and Social Exclusion*, 2009, 16 (3), pp. 90-96.
- Dargay, J., & Gately, D. (1999). Income's effect on car and vehicle ownership, worldwide: 1960–2015. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 33(2), 101-138. doi:https://doi.org/10.1016/S0965-8564(98)00026-3
- Dargay, J., Gately, D., & Sommer, M. (2007). Vehicle Ownership and Income Growth, Worldwide: 1960-2030. *The Energy Journal*, 28(4), 143-170. Tiré de <http://www.jstor.org/stable/41323125>

- De Jong, G., Fox, J., Daly, A., Pieters, M., & Smit, R. (2004). Comparison of car ownership models. *Transport Reviews*, 24(4), 379-408. doi:10.1080/0144164032000138733
- Delbosc, A. (2013). Household composition and within-household car saturation in Melbourne. *Transport Policy*, 25, 94-100. doi:https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.10.002
- Diana, M., & Pirra, M. (2016). A comparative assessment of synthetic indices to measure multimodality behaviours. *Transportmetrica A: Transport Science*, 12(9), 771-793. doi:10.1080/23249935.2016.1177133
- Diana, M., Pirra, M., Woodcock, A., & Martins, S. (2018). Supporting Urban Integrated Transport Systems: Transferable tools for Local Authorities (SUITS). Communication présentée à 7th Transport Research Arena (TRA), Vienna, Austria.
- Dieleman, F. M., Dijst, M., & Burghouwt, G. (2002). Urban Form and Travel Behaviour: Micro-level Household Attributes and Residential Context. *Urban Studies*, 39(3), 507-527. doi:10.1080/00420980220112801
- Dupuy, G. (1999). La dépendance automobile: symptômes, analyses, diagnostic, traitements: *Anthropos*.
- Dupuy, G. (2011). *Towards Sustainable Transport: The Challenge of Car Dependence*: John Libbey Eurotext.
- El Faouzi, N.-E., & Klein, L. A. (2016). Data Fusion for ITS: Techniques and Research Needs. *Transportation Research Procedia*, 15, 495-512. doi:10.1016/j.trpro.2016.06.042
- Eluru, N., Bhat, C. R., Pendyala, R. M., & Konduri, K. C. (2010). A joint flexible econometric model system of household residential location and vehicle fleet composition/usage choices. *Transportation*, 37(4), 603-626. doi:10.1007/s11116-010-9271-3
- EPA (2019) - United States Environmental Protection Agency. Global Greenhouse Gas Emissions Data. <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>. Accessed July 25, 2019.
- Feigon, S., & Murphy, C. (2018). Broadening Understanding of the Interplay Among Public Transit, Shared Mobility, and Personal Automobiles (Rapport no TCRP Research Report 195). Transportation Research Board.
- Fernandes, P., Vilaça, M., Macedo, E., Sampaio, C., Bahmankhah, B., Bandeira, J.M., Guarnaccia, C., Rafael, S., Fernandes, A.P., Relvas, H., Borrego, C., Coelho, M.C. (2019). Integrating road traffic externalities through a sustainability indicator, *Science of The Total Environment*, 2019, Volume 691, Pages 483-498.
- Ferraris, F. S. G. (2018). La mobilité de demain sera multimodale ou ne sera pas. *Le Devoir*. Tiré de <https://www.ledevoir.com/societe/transports-urbanisme/540068/mobility-as-a-service-l-avenir-sera-multimodal-ou-pas-du-tout?fbclid=IwAR3RZsKefsVngEgrdo5VAc55sk9acZaElfCxMN19lh4j4IPUX5dyEhFY6Q>
- First in Architecture. (2019, Juillet 22). Average male and female dimensions / Heights. Récupéré sur First in Architecture: <https://www.firstinarchitecture.co.uk/average-male-and-female-dimensions/>
- Fotouhi, A., Montazeri-Gh, M. (2013). Tehran driving cycle development using the k-means clustering method. *Scientia Iranica*, 2013. 20: 286-293.

- Fuller, D., Gauvin, L., Kestens, Y., Morency, P., & Drouin, L. (2013). The potential modal shift and health benefits of implementing a public bicycle share program in Montreal, Canada. *The international journal of behavioral nutrition and physical activity*, 10(1), 66-66. doi:10.1186/1479-5868-10-66
- Gallez, C. (2018). « La Dépendance automobile. Symptômes, analyses, diagnostic, traitement de Gabriel Dupuy (1999) ». *Forum Vies Mobiles - Préparer la transition mobilitaire*. Tiré de <http://fr.forumviesmobiles.org/publication/2018/09/04/dependance-automobile-symptomes-analyses-diagnostic-traitement-gabriel-dupuy-12646>
- Gärbling, T., & Steg, L. (2007). *Threats from car traffic to the quality of urban life: problems, causes and solutions*: Emerald Group Publishing Limited.
- Gebhardt, L., Krajzewicz, D., Oostendorp, R., Goletz, M., Greger, K., Klötzke, M., . . . Heinrichs, D. (2016). Intermodal Urban Mobility: Users, Uses, and Use Cases. *Transportation Research Procedia*, 14(C), 1183-1192. doi:10.1016/j.trpro.2016.05.189
- Gössling, S., Schröder, M., Späth, P. et Freytag, T. (2016). Urban Space Distribution and Sustainable Transport. *Transport Reviews*, 36, 659-679. doi:<http://doi.org/10.1080/01441647.2016.1147101>
- Graehler Jr, M., Mucci, R. A., & Erhardt, G. D. (2019). Understanding the Recent Transit Ridership Decline in Major US Cities: Service Cuts or Emerging Modes? Communication présentée à 98th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C, United States.
- Growther, Geoffrey (1964). Ministry of Transport, *Traffic in Towns: The specially shortened edition of the Buchannan Report*. London: Penguin, 1963, 12.
- Guo, Z. (2013). Does residential parking supply affect household car ownership? The case of New York City. *Journal of Transport Geography*, 26, 18-28. doi:10.1016/j.jtrangeo.2012.08.006
- H. Seitz (1993). A dual economic analysis of the benefits of the public road network, *Annals of Regional Science*, 1993, 27, pp. 223-239.
- Hampton, S. (2013). Measuring Oklahoma Main Streets. Institute for Quality Communities Blog. Repéré à <http://iqc.ou.edu/2013/08/19/mainstreets/>
- Hassan Aly, Shahin Mohamed Maher and Morsy Mahmoud (2011). Area traffic capacity in central areas – Alexandria city center as a case study *Alexandria Engineering Journal*, 2011, 50 367-380.
- He, X., Kastrouni, E., & Zhang, L. (2014). Impact of Highway Investment on the Economy and Employment across U.S. Industrial Sectors: Simultaneous Equations Analysis at the Metropolitan Level. *Transportation Research Record*, 2014, 2452(1), 1–10.
- Héran, F. (2011). Pour une approche systémique des nuisances liées aux transports en milieu urbain. *Les cahiers scientifiques du transport*, 59, 83-112. Tiré de [http://afitl.ish-lyon.cnrs.fr/tl\\_files/documents/CST/N59/Heran59.pdf](http://afitl.ish-lyon.cnrs.fr/tl_files/documents/CST/N59/Heran59.pdf)
- Huertas, J. I., L. F. Quirama, M. Giraldo, J. Díaz. (2019). Comparison of Three Methods for Constructing Real Driving Cycles. *Energies*, 2019. 12: 665.
- Hui, N., Saxe, S., Roorda, M., Hess, P. et Miller, E. J. (2018). Measuring the completeness of complete streets. *Transport Reviews*, 38, 73-95. doi:<https://dx.doi.org/10.1080/01441647.2017.1299815>

- Iacono, M., Levinson, D. M. (2015). *Methods for Estimating the Economic Impacts of Transportation Improvements: An Interpretive Review*. Edward Elgar Publishers. Retrieved from the University of Minnesota Digital Conservancy, <http://hdl.handle.net/11299/180056>.
- Jensen, M. (1999). Passion and heart in transport — a sociological analysis on transport behaviour. *Transport Policy*, 6(1), 19-33. doi:[https://doi.org/10.1016/S0967-070X\(98\)00029-8](https://doi.org/10.1016/S0967-070X(98)00029-8)
- Jones, P., Marshall, S. et Boujenko, N. (2008). Creating more people-friendly urban streets through « Link and Place » street planning and design. *IATSS Research*, 32, 14-25. doi:[https://dx.doi.org/10.1016/S0386-1112\(14\)60196-5](https://dx.doi.org/10.1016/S0386-1112(14)60196-5)
- Jones, P., Marshall, S. et Boujenko, N. (2009). « Link » and « Place »: A New Approach to Street Planning and Design. *Road and Transport Research: A Journal of Australian and New Zealand Research and Practice*, 18.
- Jouffe, Y., Caubel, D., Fol, S., Motte-Baumvol, B. (2015), Faire face aux inégalités de mobilité : Tactiques, arisienne et projets des ménages pauvres en périphérie arisienne. *Cybergeog : Revue européenne de géographie / European journal of geography*, 2015, UMR 8504 Géographie-cités.
- Karekla, X., R. Fernandez, N. Tyler. (2018). Environmental Effect of Bus Priority Measures Applied on a Road Network in Santiago, Chile. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2018. <https://doi.org/10.1177/0361198118784134>.
- Kaufman, L. and Rousseeuw, P.J. (1987), *Clustering by means of Medoids*, in *Statistical Data Analysis Based on the Norm and Related Methods*, Y. Dodge, North-Holland, 1987, pp. 405-416.
- Kenworthy, J., & Laube, F. B. (1999). Patterns of automobile dependence in cities: an international overview of key physical and economic dimensions with some implications for urban policy. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 33(7), 691-723. doi:[https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(99\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(99)00006-3)
- Khaleghi, B., Khamis, A., Karray, F. O., & Razavi, S. N. (2013). Multisensor data fusion: A review of the state-of-the-art. *Information Fusion*, 14(1), 28-44. doi:10.1016/j.inffus.2011.08.001
- Kim, H. S., & Kim, E. (2004). EFFECTS OF PUBLIC TRANSIT ON AUTOMOBILE OWNERSHIP AND USE IN HOUSEHOLDS OF THE USA. *Review of Urban & Regional Development Studies*, 16(3), 245-262. doi:10.1111/j.1467-940X.2005.00090.x
- Kim, S. H., & Mokhtarian, P. L. (2018). Taste heterogeneity as an alternative form of endogeneity bias: Investigating the attitude-moderated effects of built environment and socio-demographics on vehicle ownership using latent class modeling. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 116, 130-150. doi:10.1016/j.tra.2018.05.020
- Kitamura, R. (2009). A dynamic model system of household car ownership, trip generation, and modal split: model development and simulation experiment. *Transportation*, 36(6), 711-732. doi:10.1007/s11116-009-9241-9
- Klincevicus, M., Morency, C., & Trépanier, M. (2014). Assessing Impact of Carsharing on Household Car Ownership in Montreal, Quebec, Canada. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2416, 48-55. doi:10.3141/2416-06
- Kocur, G., Adler, T., Hyman, W., & Aunet, B. (1982). *Guide to forecasting travel demand with direct utility assessment - final report*. Washington, D. C.: National technical information service.
- Koosalapeerom, T., T. Satiennam, W. Satiennam, W. Leelapatra, A. Seedam, T. Rakpukdee. (2019). Comparative study of real-world driving cycles, energy consumption, and CO2 emissions

of electric and gasoline motorcycles driving in a congested urban corridor. *Sustainable Cities and Society*, 2019. 45: 619-627.

Kuhnimhof, T., Buehler, R., Wirtz, M., & Kalinowska, D. (2012). Travel trends among young adults in Germany: increasing multimodality and declining car use for men. *Journal of Transport Geography*, 24, 443-450. doi:10.1016/j.jtrangeo.2012.04.018

Kusakabe, T., & Asakura, Y. (2014). Behavioural data mining of transit smart card data: A data fusion approach. *Transportation Research Part C*, 46, 179-191. doi:10.1016/j.trc.2014.05.012

Lansley, G. (2016). Cars and socio-economics: understanding neighbourhood variations in car characteristics from administrative data. *Regional Studies, Regional Science*, 3(1), 264-285. doi:10.1080/21681376.2016.1177466

Lavolette, J., & Morency, C. (2019). Car Ownership in Québec & Canada: Trends, Factors & Consequences. Communication présentée à ACE 2019 (Air & Waste Management Association's Annual Conference And Exhibition), Québec, Canada.

Levinson, D. (2008). Density and dispersion: The co-development of land use and rail in London. *Journal of Economic Geography*, 2008, 8, 55-77.

Li, T. Z., Lin, J. S., Wu, M. T., & Wang, X. W. (2009). Concept and spatial analysis method of urban environmental traffic capacity. *Journal of Transportation Engineering*, 2009, Vol. 135(11), pp. 873-879.

Lindsey, R. (2012), Road Pricing and Investment, *Econ. Transp.*, 2012, 1 (1), pp. 49-63.

Litman, T. (2002). Evaluating Transportation Equity, *World Transport Policy & Practice* 2002, Volume 8, No. 2, Summer, pp. 50-65.

Liu, G., Li, Y., Guo, J., Li, Z. (2015), Maximum transport capacity of a network. *Physica A*, 2015, 432, 315-320.

Lovelace, R., Birkin, M., Cross, P., & Clarke, M. (2016). From Big Noise to Big Data: Toward the Verification of Large Data sets for Understanding Regional Retail Flows. *Geographical Analysis*, 48(1), 59-81. doi:10.1111/gean.12081

Ma, R., X. He, Y. Zheng, B. Zhou, S. Lu, and Y. Wu. (2019). Real-world driving cycles and energy consumption informed by large-sized vehicle trajectory data. *Journal of Cleaner Production*, 2019. 223: 564-574.

Martens, K. et Di Ciommo, F. (2017). Travel time savings, accessibility gains and equity effects in cost-benefit analysis. *Transport Reviews*, 37(2), 152-169. doi:10.1080/01441647.2016.1276642

Matas, A., & Raymond, J.-L. (2008). Changes in the structure of car ownership in Spain. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42(1), 187-202. doi:10.1016/j.tra.2007.08.005

Mattioli, G. (2014), Where Sustainable Transport and Social Exclusion Meet: Households Without Cars and Car Dependence in Great Britain, *Journal of Environmental Policy & Planning*, 2014.

Ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques. (2019) Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2016 et leur évolution depuis 1990. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/2016/inventaire1990-2016.pdf>. Accessed July 25, 2019.

- Mohammadian, A., & Miller, E. J. (2002). Nested Logit Models and Artificial Neural Networks for Predicting Household Automobile Choices: Comparison of Performance. *Transportation Research Record*, 1807(1), 92-100. doi:10.3141/1807-12
- Mohammadian, A., & Rashidi, T. H. (2007). Modeling Household Vehicle Transaction Behavior: Competing Risk Duration Approach. *Transportation Research Record*, 2014(1), 9-16. doi:10.3141/2014-02
- Morency, C., Trépanier, M., Saunier, N., Verreault, H., & Bourdeau, J.-S. (2018). Using 5 parallel passive data streams to report on a wide range of mobility options. *Transportation Research Procedia*, 32, 82-92.
- Mundy, D., M. Trompet, J. M. Cohen, and D. J. Graham. (2017). The identification and management of bus priority schemes: A study of international experiences and best practices. Imperial College London: Railway and Transport Strategy Centre, 2017.
- Munizaga, M., Devillaine, F., Navarrete, C., & Silva, D. (2014). Validating travel behavior estimated from smartcard data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 44, 70-79. doi:10.1016/j.trc.2014.03.008
- NCHRP (2002). The Positive Impacts of Transportation Investment NCHRP Project 8-36, Task 22, compilation of working papers ([http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/notesdocs/NCHRP08-36\(22\)\\_FR.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/notesdocs/NCHRP08-36(22)_FR.pdf))
- Newman, P., & Kenworthy, J. (1989). *Cities and Automobile Dependence: A Sourcebook*: Gower.
- Newman, P., & Kenworthy, J. (1999). *Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence*. Washington D.C.: Island Press.
- Newman, P., & Kenworthy, J. (2015). *The End of Automobile Dependence: How Cities Are Moving Beyond Car-Based Planning*. Washington, DC: Island Press/Center for Resource Economics.
- Nolan, A. (2010). A dynamic analysis of household car ownership. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(6), 446-455. doi:https://doi.org/10.1016/j.tra.2010.03.018
- Nouri, P., Morency, C. (2017). Evaluating Microtrip Definitions for Developing Driving Cycles. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2017. <http://dx.doi.org/10.3141/2627-10>
- Nouri, Pegah. (2015). *Enhancing the Gasoline Vehicles' CO2 Emissions estimation in Montreal*. Polytechnique Montréal. Montréal : s.n., 2015.
- Paleti, R., Bhat, C. R., Pendyala, R. M., & Goulias, K. G. (2013). Modeling of Household Vehicle Type Choice Accommodating Spatial Dependence Effects. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2343(1), 86-94. doi:10.3141/2343-11
- Patton, J. W. (2007). A Pedestrian World: Competing Rationalities and the Calculation of Transportation Change. *Environment and Planning A*, 39, 928-944. doi:https://doi.org/10.1068/a389
- Peng, Y., Y. Zhuang, and Y. Yang. (2019). A driving cycle construction methodology combining k-means clustering and Markov model for urban mixed roads. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering*, 2019. <https://doi.org/10.1177/0954407019848873>

- Pinjari, A. R., Pendyala, R. M., Bhat, C. R., & Waddell, P. A. (2011). Modeling the choice continuum: an integrated model of residential location, auto ownership, bicycle ownership, and commute tour mode choice decisions. *Transportation*, 38(6), 933. doi:10.1007/s11116-011-9360-y
- Potoglou, D., & Kanaroglou, P. S. (2008). Modelling car ownership in urban areas: a case study of Hamilton, Canada. *Journal of Transport Geography*, 16(1), 42-54. doi:10.1016/j.jtrangeo.2007.01.006
- Potoglou, D., & Susilo, Y. O. (2008). Comparison of Vehicle-Ownership Models. *Transportation Research Record*, 2076(1), 97-105. doi:10.3141/2076-11
- Rebecq, A. (2016). Icarus: un package r pour le calage sur marges et ses variantes. Communication présentée à 9e colloque francophone sur les sondages, Gatineau (Canada).
- Rodriguez-Valencia, A. (2014). The Urban Right-of-way Allocation Problem: Considering All Demands. Communication présentée au TRB 93rd Annual Meeting Compendium of Papers, Washington, DC, United States (p. 18). Repéré à <https://trid.trb.org/view/1288973>
- Rolfe, J., Flint, N. (2018). Assessing the economic benefits of a tourist access road: a case study in regional coastal Australia. *Econ. Anal.*, 2018, Policy 58, 167–178.
- SAAQ, 2017 Statistics SAAQ Annual Report on Accidents, Fleet and Driver Licenses, 2017.
- SAAQ. (2018a). Données et statistiques 2017. Québec: Société de l'assurance automobile du Québec. Tiré de <https://saaq.gouv.qc.ca/fileadmin/documents/publications/donnees-statistiques-2017.pdf>
- SAAQ. (2018b). Nombre de véhicules en circulation selon le type d'utilisation, le type de véhicule et l'âge du véhicule, Québec et régions administratives. Tiré de [http://www.bdso.gouv.qc.ca/pls/ken/ken213\\_afich\\_tabl.page\\_tabl?p\\_iden\\_tran=REPERAU78HS14-47196194527m46H&p\\_lang=1&p\\_m\\_o=SAAQ&p\\_id\\_ss\\_dmn=718&p\\_id\\_raprt=3372](http://www.bdso.gouv.qc.ca/pls/ken/ken213_afich_tabl.page_tabl?p_iden_tran=REPERAU78HS14-47196194527m46H&p_lang=1&p_m_o=SAAQ&p_id_ss_dmn=718&p_id_raprt=3372)
- Saha, A., Chakraborty, S., Chandra, S., Ghosh, I. (2018). Kriging based saturation flow models for traffic conditions in Indian cities, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2018, Volume 118, Pages 38-51.
- Sajous, P. (2017). Mobilité quotidienne automobile en périurbain francilien et changement environnemental : les apports de la notion de savoir-faire, *Flux*, 2017, vol. 107, no. 1, pp. 3-16.
- Sautory, O. (2018). Les méthodes de calage. Insee, Département des méthodes statistiques.
- Shay, E., & Khattak, A. J. (2012). Household Travel Decision Chains: Residential Environment, Automobile Ownership, Trips and Mode Choice. *International Journal of Sustainable Transportation*, 6(2), 88-110. doi:10.1080/15568318.2011.560363
- Smeed, R. J. (1966). The road capacity of city centers, *Traffic Engineering and Control*, 1966, 8 (7), pp. 455-458.
- Société de transport de Montréal. (2019). Principaux indicateurs et résultats au 31 juillet 2019. Tiré de [http://www.stm.info/sites/default/files/media/CA/2019/indicateurs\\_strategiques\\_ca\\_31\\_juillet\\_2019.pdf](http://www.stm.info/sites/default/files/media/CA/2019/indicateurs_strategiques_ca_31_juillet_2019.pdf)
- Spickermann, A., Grienitz, V., & von der Gracht, H. A. (2014). Heading towards a multimodal city of the future? Multi-stakeholder scenarios for urban mobility. *Technological Forecasting And Social Change*, 89, 201-221. doi:10.1016/j.techfore.2013.08.036

Spurr, T., Chu, A., Chapleau, R., & Piché, D. (2015). A Smart Card Transaction "Travel Diary" to Assess the Accuracy of the Montréal Household Travel Survey. *Transportation Research Procedia*, 11, 350-364. doi:10.1016/j.trpro.2015.12.030

Statistique Canada. (2018). Tableau 17-10-0005-01 : Estimations de la population au 1er juillet, par âge et sexe. Tiré de <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=1710000501>

STM (Société de transport de Montréal) (2019). Rapport annuel 2017. [https://www.stm.info/sites/default/files/affairespubliques/Communiqués/Rapport\\_annuel\\_2017/ap\\_rapport\\_annuel\\_2017\\_final.pdf](https://www.stm.info/sites/default/files/affairespubliques/Communiqués/Rapport_annuel_2017/ap_rapport_annuel_2017_final.pdf). Accessed July 25, 2019.

STM (Société de transport de Montréal) (2019). Rapport d'activité 2018. <http://www.stm.info/sites/default/files/pdf/fr/ra2018.pdf>. Accessed July 25, 2019.

Stokes, G., & Hallett, S. (1992). The role of advertising and the car. *Transport Reviews*, 12(2), 171-183. doi:10.1080/01441649208716812

Storchmann, K. (2005). Long-Run Gasoline demand for passenger cars: the role of income distribution. *Energy Economics*, 27(1), 25-58. doi:10.1016/j.eneco.2004.03.002

Sustainable Development Commission (UK), *Fairness in a Car-dependent Society*, 2011.

Tertoolen, G., Van Kreveld, D., & Verstraten, B. (1998). Psychological resistance against attempts to reduce private car use. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 32(3), 171-181.

The City of Stockholm Traffic Administration. (2012). *Urban Mobility Strategy* (p. 72). Stockholm, Suède : City of Stockholm. Repéré à <https://international.stockholm.se/globalassets/ovriga-bilder-och-filer/urban-mobility-strategy.pdf>

Van Acker, V. (2010). Spatial and social variations in travel behaviour: incorporating lifestyles and attitudes into travel behaviour-land use interaction research. (Ghent University). Tiré de <http://hdl.handle.net/1854/LU-908738>

Van Acker, V., & Witlox, F. (2010). Car ownership as a mediating variable in car travel behaviour research using a structural equation modelling approach to identify its dual relationship. *Journal of Transport Geography*, 18(1), 65-74. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2009.05.006>

Van Acker, V., Mokhtarian, P. L., & Witlox, F. (2014). Car availability explained by the structural relationships between lifestyles, residential location, and underlying residential and travel attitudes. *Transport Policy*, 35, 88-99. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.05.006>

Vélo Québec. (2015). L'état du vélo au Québec en 2015. Tiré de [http://www.velo.qc.ca/files/file/expertise/VQA\\_EDV2015\\_fr\\_lr.pdf](http://www.velo.qc.ca/files/file/expertise/VQA_EDV2015_fr_lr.pdf)

Verreault, H., & Morency, C. (2011). Transcending the Typical Weekday with Large-Scale Single-Day Survey Samples. *Transportation Research Record*, (2230), 38-47. doi:10.3141/2230-05

Ville de Montréal. (2017). Plan d'action de la Stratégie centre-ville: soutenir l'élan. Ville de Montréal. Repéré à [http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?\\_pageid=9517,142747661&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL](http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=9517,142747661&_dad=portal&_schema=PORTAL)

Vivre en Ville. (2018). Dépendance à l'automobile [Collectivitesviables.org](http://collectivitesviables.org), Vivre en Ville. Tiré de <http://collectivitesviables.org/articles/dependance-a-l-automobile.aspx>

Vivre en ville. (s.d.). « Dépendance à l'automobile ». [Collectivitesviables.org](http://collectivitesviables.org). Tiré de <http://collectivitesviables.org/articles/dependance-a-l-automobile.aspx>

- Wang, Z., J. Zhang, P. Liu, C. Qu, and X. Li. (2019). Driving Cycle Construction for Electric Vehicles Based on Markov Chain and Monte Carlo Method: A Case Study in Beijing. *Energy Procedia*, 2019. 158: 2494-2499.
- Weisbrod, G. (2007) Models to Predict the Economic Development Impact of Transportation Projects: Historical Experience and New Applications. *Annals of Regional Science*, Vol. 42, No. 3, 2007, pp. 519–543.
- Xiao, Z., Z. Dui-Jia, and S. Jun-Min. (2012). A Synthesis of Methodologies and Practices for Developing Driving Cycles. *Energy Procedia*, 2012. 16: 1868-1873.
- Yamamoto, T. (2009). Comparative analysis of household car, motorcycle and bicycle ownership between Osaka metropolitan area, Japan and Kuala Lumpur, Malaysia. *Transportation*, 36(3), 351-366. doi:10.1007/s11116-009-9196-x
- Yang, S., Wu, J., Qi, G., & Tian, K., (2017) Analysis of traffic state variation patterns for urban road network based on spectral clustering. *Advances in Mechanical Engineering*. Volume: 9 issue: 9.
- Yu, L., Z. Wang, F. Qiao, and Y. Qi. (2008). Approach to Development and Evaluation of Driving Cycles for Classified Roads Based on Vehicle Emission Characteristics. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2008. <https://doi.org/10.3141/2058-08>.
- Yuhui, P., Z. Yuan, Huibao, Y. (2017). Development of a representative driving cycle for urban buses based on the K-means cluster method. *Cluster Computing*, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10586-017-1673-y>.
- Zhang, K., Chen, G., Wang, X., Liu, S., Mak, C.M., Fan, Y. et al. (2019). Numerical evaluations of urban design technique to reduce vehicular personal intake fraction in deep street canyons, *Sci. Total Environ.*, 2019, 653, pp. 968-994.
- Zhao, F., Sun, H., Wu, J. Gao, Z. (2014). Urban road network evolution to maximize the capacity, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Volume 138, 14 July 2014, Pages 251-258.
- Zhao, X., J. Ma, S. Wang, Y. Ye, Y. Wu, and M. Yu. (2018). Developing an electric vehicle urban driving cycle to study differences in energy consumption. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018. 26:13839-13853.
- Zheng, Y. (2015). Methodologies for Cross-Domain Data Fusion: An Overview. *IEEE Transactions on Big Data*, 1(1), 16-34. doi:10.1109/TBDATA.2015.2465959
- Zhong, C., Huang, X., Müller Arisona, S., Schmitt, G., & Batty, M. (2014). Inferring building functions from a probabilistic model using public transportation data. *Computers, Environment and Urban Systems*, 48, 124-137. doi:10.1016/j.compenvurbsys.2014.07.004
- Zorn, L., Sall, E., & Wu, D. (2012). Incorporating crowding into the San Francisco activity-based travel model. *Transportation*, pp. 755-771.