

# Chaire Mobilité

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

## Rapport d'activités 2023



# Chaire Mobilité

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

## Rapport d'activités 2023

---

### *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, Geneviève Bastien, Yannick Brosseau, Samuel Duhaime-Morissette – 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)

*Juin 2024*

*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 (2023). Rapport synthèse d'activités 2023, Polytechnique Montréal, 117 pages.

# Table des matières

## Table des matières

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	Équipe de recherche.....	2
1.2.3	Collaborateurs .....	4
1.2.4	Comité scientifique.....	4
1.3	Programme de recherche.....	4
1.4	Contenu du rapport.....	5
2	Activités de recherche .....	6
2.1	Recherches en cours.....	7
2.1.1	Comportements de déplacements anticipés dans un monde post-pandémique... 7	
2.1.2	Vulnérabilité des réseaux de transport en commun.....	23
2.1.3	Comparaison des modèles de temps et de vitesses de bus à différents niveaux d'analyse pour la planification des transports en commun .....	35
2.1.4	Modélisation des déterminants de la demande multimodale et de sa variabilité	46
2.1.5	Caractérisation de la complémentarité entre le vélo et le transport en commun	57
2.1.6	Définir et mesurer la multimodalité de l'offre de transport .....	63
2.1.7	Méthodologie d'extraction, de fusion et d'enrichissement de données spatio-temporelles dans le domaine des transports.....	70
2.1.8	Impact de l'intégration de composantes urbaines dynamiques sur les mesures d'accessibilité .....	74
2.1.9	Modélisation des facteurs ayant une incidence sur la qualité des trajets en transport en commun.....	80
2.1.10	Modélisation de la motorisation des ménages et de l'accès au véhicule privé....	83
2.1.11	Méthode de fusion et d'actualisation d'enquêtes .....	85
2.1.12	État d'avancement du développement de la plateforme Transition .....	93
2.1.13	Défis et enjeux de l'électrification des transports.....	95
2.1.14	Perspectives sur le potentiel du VAÉ.....	100
3	Rayonnement .....	105
3.1	Publications (2023).....	105
3.2	Principales participations à des congrès .....	105

3.2.1	Congrès annuel du Transportation Research Board 2023 (Washington DC) .....	105
3.2.2	Congrès annuel de l'AQTR 2023 (Québec) .....	105
3.2.3	Canadian Transport Research Forum 2023 (Toronto).....	105
3.2.4	5 <sup>e</sup> Rencontres francophones transport mobilité 2023 – Dijon (France) .....	106
3.2.5	World Conference on Transport Research 2023 (Montréal).....	106
3.2.6	Autres .....	107
4	Références .....	108

# Liste des figures

Figure 1-1. Représentation schématique du programme de recherche de la Chaire Mobilité .....	5
Figure 2-1. Cadre méthodologique.....	11
Figure 2-2. Diagramme de dispersion des HoTys OD et CTS selon l'âge moyen et l'amplitude d'âge .....	15
Figure 2-3. Pourcentage de ménages OD et CTS dans chaque NoTy (nD = 153 997, nCTS = 3 333) .....	16
Figure 2-4. Prédiction du nombre total de déplacements en TC des PeTys agrégés selon trois scénarios.....	19
Figure 2-5. Réseau métropolitain de Montréal.....	27
Figure 2-6. Attributs des déplacements à l'état normal.....	28
Figure 2-7. Implémentation de BBFS dans le réseau métropolitain de Montréal .....	29
Figure 2-8. Simulation de scénarios de défaillance.....	30
Figure 2-9. Diagrammes de régression linéaire.....	33
Figure 2-10. Cadre de recherche .....	37
Figure 2-11. Histogramme des erreurs pour les modèles directs (gauche) et indirects (droite)..	41
Figure 2-12. Erreurs agrégées par vitesse moyenne observée .....	42
Figure 2-13. Erreurs agrégées selon la longueur du segment.....	43
Figure 2-14. Cadre général de l'étude .....	47
Figure 2-15. Définition complète de la demande latente totale.....	53
Figure 2-16. Distribution des données avec des bornes supérieure et inférieure d'un écart type .....	54
Figure 2-17. Détection de points de changement basée sur les noyaux incluant les jours non ouvrables avec coût de RBF.....	55
Figure 2-18. Détection de points de changement basée sur les noyaux incluant les jours non ouvrables avec fonction de coût linéaire .....	55
Figure 2-19. Variation de la surface de la surface accessible en 10 minutes à vélo autour des stations de la ligne orange, on fonction de la variation du confort cyclable .....	62
Figure 2-20. Cartes montrant les divisions du territoire (de gauche à droite: les aires de diffusion et la grille équivalente, les secteurs du recensement et la grille équivalente, les secteurs municipaux et la grille équivalente) .....	67
Figure 2-21. Carte montrant la variation de l'indicateur de disponibilité, accessibilité et qualité de service pour différents modes .....	69
Figure 2-22. Classification de Dasarathy .....	72
Figure 2-23. Profil d'accumulation de personnes à travers un jour moyen de semaine (Source : OD 2018).....	74
Figure 2-24. Superficie totale des supermarchés ouverts sur l'île de Montréal (Source: Open Street Map) .....	75
Figure 2-25. Nombres de passages de transport collectif de la STM par heure un jour de semaine (Source: GTFS 11/2023).....	75
Figure 2-26. Découpage de l'île de Montréal .....	78
Figure 2-27 Méthodologie générale.....	87
Figure 2-28. Parts modales des déplacements estimés pour 2013, 2018 et pour l'échantillon combiné.....	89
Figure 2-29. Répartition des motifs de déplacements estimés pour 2013, 2018 et pour l'échantillon combiné .....	90

Figure 2-30. Répartition des régions de destinations estimées pour 2013, 2018 et pour l'échantillon combiné .....	90
Figure 2-31. Distributions des facteurs de pondération pour 2019 et pour l'enquête combinée	91
Figure 2-32 Comparaison avant (à gauche) - après (à droite) l'ajout de la fonctionnalité des trajets affichés séparément .....	94
Figure 2-33. Comparaison internationale des émissions de GES en transport et totaux (Sources : OCDE Stats et données nationales, voir rapport complet pour l'ensemble des références).....	95
Figure 2-34 Synthèse des cibles (Sources : voir rapport complet pour l'ensemble des références) .....	97
Figure 2-35 Calcul de la contribution de l'électrification de 55 % des autobus urbains à la réduction des émissions de GES au Québec (Sources : Québec, Inventaire Québécois des émissions de gaz à effet de serre et Ressources naturelles Canada, Base nationale de consommation d'énergie)...	98
Figure 2-36 Calcul de la contribution de l'électrification de 55 % des autobus urbains à la réduction des émissions de GES ailleurs dans le monde et contribution relative du transfert modal (Sources : données nationales, voir rapport complet pour l'ensemble des références).....	98
Figure 2-37 Évaluation qualitative des bénéfices sociaux associés à l'électrification des autobus et à une augmentation de l'offre de transport en commun (Sources : Diamond et al. (2021) et analyse des motivations des juridictions, voir rapport complet pour l'ensemble des références) .....	99
Figure 2-38 Freins à l'utilisation du vélo/VAÉ pour se rendre au lieu de travail.....	101
Figure 2-39. Raisons pour lesquelles le VAÉ pourrait être plus attractif que le vélo non-électrique pour se rendre au lieu de travail .....	101
Figure 2-40. Raisons pour lesquelles le VAÉ pourrait être plus attractif que d'autres modes de transport pour se rendre au lieu de travail (excluant le vélo).....	102
Figure 2-41. Principaux moyens que l'employeur peut mettre en place afin d'encourager les déplacements à vélo ou en VAÉ pour se rendre au travail .....	102
Figure 2-42. Incitatif(s) que la municipalité ou le gouvernement pourraient mettre en place pour encourager les déplacements à vélo ou en VAÉ .....	103
Figure 2-43. Intentions d'achat pré et post essai.....	103
Figure 2-44 Horizon temporel pour l'achat d'un VAÉ .....	104

## Liste des tableaux

Tableau 2-1. HoTys et leurs centres de groupes correspondants – Enquêtes OD 2013 et 2018..	14
Tableau 2-2. NoTys et leurs centres de groupes correspondants – Enquêtes OD 2013 et 2018..	14
Tableau 2-3. 3 Catégories agrégées de PeTy.....	17
Tableau 2-4. Taux de déplacement prévus de PeTys agrégés (TD: Taux de Déplacement).....	20
Tableau 2-5. Comparaison des attributs dans les scénarios d'interruptions.....	30
Tableau 2-6. Demande satisfaite et surplus de temps de trajet dans les différents scénarios ....	31
Tableau 2-7. Résultats de la régression linéaire.....	32
Tableau 2-8. Effets aléatoires pour les modèles linéaires mixtes .....	38
Tableau 2-9. Effets fixes pour les modèles linéaires mixtes.....	39
Tableau 2-10. Mesures d'erreurs pour les modèles.....	41
Tableau 2-11. Changement de la moyenne de la fréquentation quotidienne entre chaque paire d'années .....	55
Tableau 2-12. Résultats de la détection de points de changement (CPD) .....	56
Tableau 2-13. Cadres d'étude statique-dynamique .....	77
Tableau 2-14. Table des catégories de commerces .....	78

Tableau 2-15. Récapitulatif des données .....	79
Tableau 2-16 Reconstruction des populations et des déplacements de référence à partir des facteurs obtenus par l'IPU.....	88
Tableau 2-17 Nombre de passagers par ligne de train de banlieue pour 2013, 2018 et pour l'enquête combinée .....	91
Tableau 2-18. Répartition des poids des échantillons de 2013 et 2018 dans l'enquête combinée .....	92

# 1 Introduction

## 1.1 Mission générale de la Chaire Mobilité

La Chaire Mobilité a commencé ses activités en 2010, dans le contexte où plusieurs organisations 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. Depuis, les activités de recherche se poursuivent avec des partenariats renouvelés cycliquement.

Les objectifs de la Chaire ont 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 maîtrise, 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 du Québec ainsi que l'Agence métropolitaine de transport.

Avec les changements dans la gouvernance métropolitaine des transports, les mandats successifs de la Chaire Mobilité sont soutenus par cinq partenaires : la Ville de Montréal, la Société de transport de Montréal, le ministère des Transports du Québec, l'Agence régionale de transport métropolitain et Exo (réseau de transport métropolitain).

### 1.2.2 Équipe de recherche

La Chaire compte sur la riche contribution de sept 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.
  - **Geneviève Bastien**, M.Sc.A., associée de recherche. Titulaire d'un baccalauréat et d'une maîtrise en génie informatique à Polytechnique Montréal, Geneviève a plus de 15 ans d'expérience en développement logiciel en grande entreprise, comme travailleuse autonome, puis dans le milieu académique. Avant de rejoindre la Chaire Mobilité en 2020, elle était, et est toujours, associée de recherche au laboratoire Dorsal en génie informatique, qui se spécialise dans l'analyse de performance de systèmes informatiques complexes, parallèles et/ou distribués. Elle a eu l'occasion de contribuer au développement de plusieurs projets logiciels libres et open source. Son intérêt pour les questions de mobilité l'ont conduit à la Chaire où elle participe au développement de plateformes logicielles permettant aux étudiants et partenaires de développer et mettre en application divers approches/algorithmes/modèles innovants.
  - **Yannick Brosseau**, M.Sc.A., associé de recherche. Yannick est un ingénieur informatique polyvalent spécialisé en logiciel libre. Il est détenteur d'une maîtrise en intelligence artificielle appliquée à la robotique mobile de l'Université de Sherbrooke. Il s'est joint à l'équipe de la Chaire mobilité de la Polytechnique Montréal pour supporter les efforts d'ouverture du code des projets de recherche ainsi que l'infrastructure informatique. Dans ses temps libres, il aide des startups à bien identifier leurs besoins en développement logiciel et d'infrastructure. Précédemment, il était Production Engineer et Hardware System Engineer pour Facebook/Meta, où il a travaillé au sein des équipes Kernel et Firmware. Il a travaillé sur des outils d'analyse de performance pour Linux au laboratoire Dorsal, encore une fois à Polytechnique Montréal. Ceci en plus de travaux dans plusieurs domaines tel que les appareils médicaux, plateformes embarquées GPS et développement web.
  - **Samuel Duhaime-Morrisette**, B.Éd., associé de recherche. Développeur web depuis plus de 3 ans, Samuel détient un baccalauréat en enseignement de l'éducation physique et à la santé de l'Université Laval. En tant qu'entrepreneur, il a fondé une startup dédiée à simplifier l'accès des enseignants à des ressources pédagogiques de haute qualité. Au sein de la Chaire Mobilité de Polytechnique Montréal, Samuel s'est distingué en se concentrant sur le développement web des enquêtes Origines-Destination, offrant ainsi une perspective approfondie sur les habitudes de mobilité de la population. Sa passion pour la mobilité et son savoir-faire en développement web s'illustrent de manière tangible au sein de la Chaire Mobilité, où il apporte une contribution significative.

### 1.2.3 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, professeur 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

### 1.2.4 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 :

- Prof Kelly Clifton (depuis 2020): School of Community and Regional Planning, University of British Columbia.
- Dr Caroline Bayart (depuis 2022): maître de conférences en Sciences de gestion à l'Université Claude Bernard Lyon 1 et affiliée au Laboratoire Aménagement Économie Transports de Lyon.
- Prof Trevor Hanson (depuis 2023) : Transportation group, University of New-Brunswick.
- Pr Antonio Paez: École de géographie et des sciences de la terre de l'Université McMaster.
- Pr Matthew Roorda: Département de génie civil de l'Université de Toronto.

## 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 : 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.

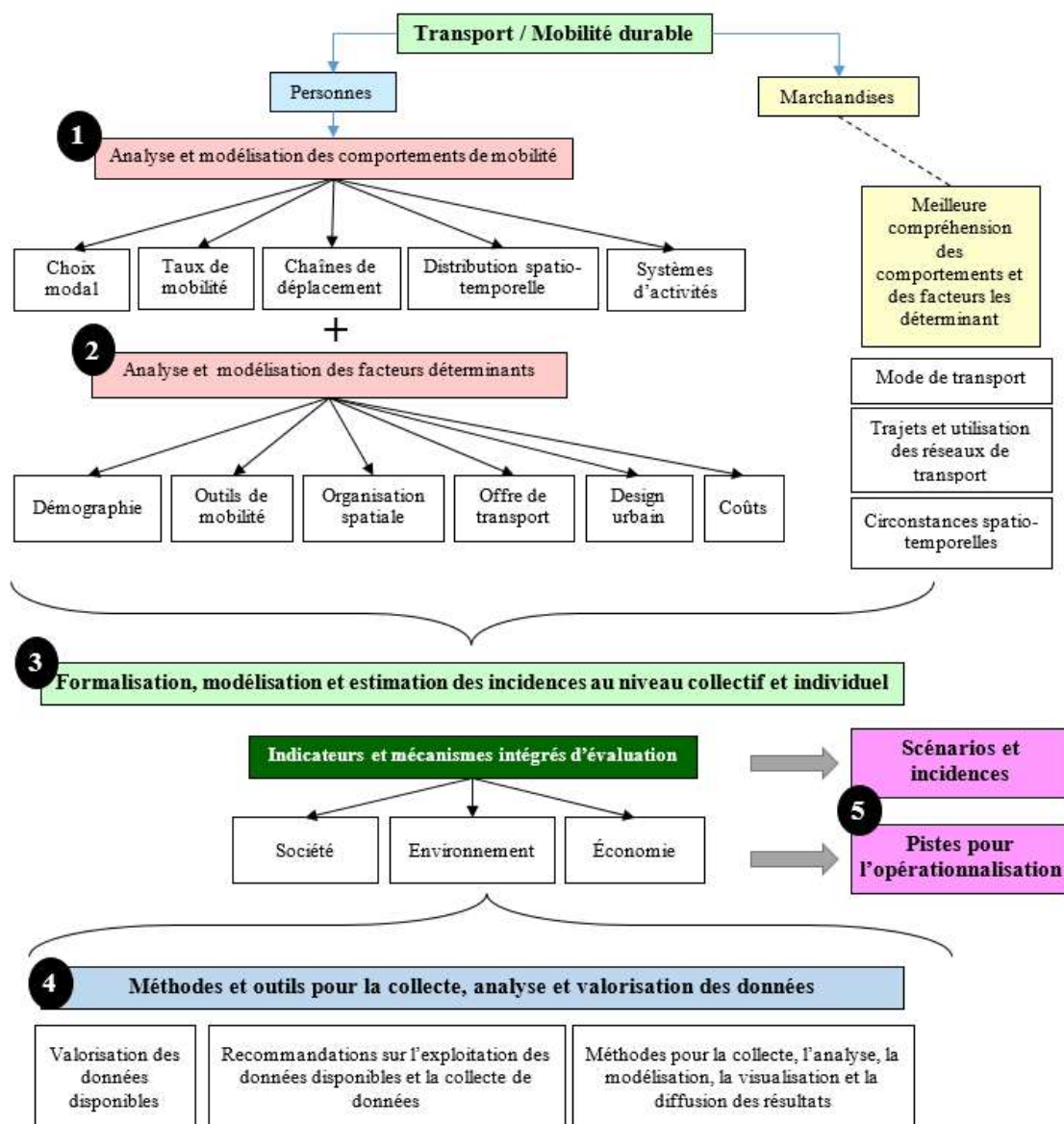


Figure 1-1. Représentation schématique du programme de recherche de la Chaire Mobilité

## 1.4 Contenu du rapport

Ce document propose une synthèse des activités conduites du 1<sup>er</sup> janvier au 31 décembre 2023. Les différentes activités de recherche conduites par l'équipe de recherche sont décrites dans la prochaine section. Les activités de rayonnement réalisées en 2023 sont aussi listées.

Les textes relatifs à l'avancement des travaux de maîtrise et doctorat sont souvent des extraits préliminaires des futurs mémoires et thèses. Les mémoires et thèses complétés ne sont pas inclus dans le rapport mais sont référencés et peuvent être obtenus par les partenaires.

David Murray ayant complété son mémoire au moment de produire le rapport, aucune synthèse n'est incluse mais son document complet peut-être obtenu.

## 2 Activités de recherche

Plusieurs maîtrises et doctorats ont été complétés en 2023 :

- Keshawarz, Hedieh (2023). Definition and analysis of respondent burden in web-based travel surveys, Mémoire de maîtrise. Direction: Catherine Morency.
- Chekir, Eya (2023). Diagnostic de l'accessibilité piétonne aux stations du métro montréalais, Mémoire de maîtrise. Direction : Catherine Morency.
- Zanolini, Mathilde (2023). Caractériser et quantifier les interactions entre coûts de transport et d'habitation dans la Région Métropolitaine de Montréal, Mémoire de maîtrise. Direction: Catherine Morency.
- Selmi, Ikram (2023). Estimation des destinations des usagers du transport collectif à l'aide de données de carte à puce, mémoire de maîtrise. Direction: Martin Trépanier, Codirection : Catherine Morency.
- Dabboussi, Mohamad (2023). Assessing the impact of trip chains on travel behavior, mémoire de maîtrise. Direction: Catherine Morency, Codirection : Geneviève Boisjoly.
- Deschaintres, Élodie (2023). Modélisation des interactions entre les modes de transport par l'intégration de sources diversifiées de données, Thèse de doctorat. Direction: Catherine Morency, Codirection: Martin Trépanier
- Laviolette, Jérôme (2023). Modelling the Factors Influencing Car Ownership, Thèse de doctorat. Direction: Catherine Morency, Codirection : Owen Waygood et Kostas Goulias.
- Khachman, Mohamed (2023). Synthèse spatialisée de la population pour fins de modélisation des comportements de mobilité, Thèse de doctorat. Direction: Catherine Morency, Codirection: Francesco Ciari.
- Yarahmadi, Asad (2023). A Methodological Framework to Develop Optimal Sets of Driving Cycles for a Region, Direction: Catherine Morency, Codirection: Martin Trépanier
- Garnier, Camille (2023). Contributions à l'amélioration des services de transport adapté, Thèse de doctorat, Direction: Martin Trépanier, Codirection: Catherine Morency.

## 2.1 Recherches en cours

### 2.1.1 Comportements de déplacements anticipés dans un monde post-pandémique

Par : Hamed Malekzadeh, doctorat  
Supervision : Pre Catherine Morency  
Contexte : Chaire Mobilité  
Fin prévue : mai 2025

#### 2.1.1.1 INTRODUCTION

La déclaration de COVID-19 en tant que pandémie mondiale par l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) en mars 2020 a eu des impacts sans précédent sur de nombreux aspects de la vie humaine, en particulier les comportements de déplacement. Parmi les divers modes de transport, le transport en commun est devenu l'un des modes les plus touchés. Les enquêtes sur la mobilité confirment que les comportements sont fortement liés à la période d'étude et que l'utilisation des différents modes présente des variations significatives d'une phase à l'autre de la pandémie. Des recherches approfondies tout au long des phases de la COVID-19 ont révélé une baisse importante de l'achalandage des transports en commun, indiquant une chute significative de plus de 90% en conséquence directe de la pandémie (Bucsky, 2020; Cohen, 2020; Pozo et al., 2022; Wilbur et al., 2023). Par exemple, Madrid a connu une baisse de 95% au plus fort de la pandémie, atteignant seulement 50% des niveaux d'avant la pandémie dans les phases suivantes (Pozo et al., 2022). Les résultats d'une autre étude indiquent que même après la diminution du virus, on s'attend à une baisse de 20 % de l'utilisation du transport en commun (Currie et al., 2021). En général, les phases initiales de l'éclosion de COVID-19 ont entraîné une baisse importante de l'achalandage des transports en commun ; cependant, il y a eu une croissance lente au fil du temps l'achalandage continue de reprendre. Plusieurs autres études ont exploré les effets de la COVID-19 sur le transport en commun. Par exemple, des études menées à Hanovre, en Allemagne, ont révélé que la diminution de l'utilisation des autobus et du train léger était due à un recours plus important au vélo, à la voiture et au télétravail (Schaefer et al., 2021). Une autre recherche a observé un virage vers la marche et le vélo en remplacement du transport en commun (Zhang & Lee, 2021). Des études connexes ont également signalé une augmentation significative de l'utilisation du vélo, conséquence de l'évitement des transports en commun (Li et al., 2021).

Toutes ces recherches impliquent que cette situation sans précédent a posé d'énormes défis pour les systèmes de transport public dans le monde entier. L'objectif de cette étude est d'anticiper l'achalandage potentiel du transport en commun dans la grande région de Montréal (GMA) dans la période post-pandémique. Pour ce faire, on étudiera le comportement de déplacement attendu des personnes à l'aide des données recueillies au moyen de trois vagues d'un sondage en ligne menées entre 2020 et 2022. L'analyse repose sur une approche pseudo-panel.

#### 2.1.1.2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

La majeure partie de la littérature existante examinant les impacts de COVID-19 sur le comportement de déplacement s'est principalement concentrée sur les effets de la pandémie sur les comportements de mobilité individuels. Cependant, dans la plupart de ces études, la façon dont les gens prévoient se déplacer après la pandémie n'a pas été prise en compte. Lorsqu'il s'agit d'étudier les effets à long terme de la pandémie sur le transport en commun, les études pertinentes deviennent encore plus limitées. Ces études peuvent généralement être classées en deux groupes: celles qui ont souligné l'importance de tenir compte des effets des facteurs psychologiques sur l'utilisation du transport en commun, et celles qui ont étudié les changements attendus dans le comportement et les activités de déplacement.

En ce qui concerne l'importance de tenir compte des facteurs psychologiques, une étude liée à l'achalandage du transport en commun et au bien-être des voyageurs a révélé que la satisfaction à l'égard des mesures anti-COVID affecte le bien-être général et peut servir d'indicateur. L'importance de prendre en compte les facteurs psychologiques pour comprendre les défis auxquels le transport en commun est confronté après la pandémie a également été soulignée (Wang & Gao, 2022). Currie et al. (2021) ont étudié le comportement de déplacement après la pandémie et ont souligné la peur de l'infection chez les usagers du transport en commun. Ils ont constaté une diminution de 20 % de l'utilisation du transport en commun même après la diminution du virus, ce qui indique que l'achalandage pourrait ne pas se rétablir complètement. Ils ont également indiqué que le travail à distance devrait se poursuivre à des niveaux plus élevés (Currie et al., 2021). De Vos (2020) et Hensher (2020) suggèrent également une réduction des déplacements en raison des craintes d'infection même après la pandémie, avec une utilisation plus faible des transports en commun par rapport au niveau pré-COVID et une baisse significative de la mobilité partagée (De Vos, 2020; Hensher, 2020). De Haas et al. (2020) ont observé un virage vers les voitures privées et une réduction de la désirabilité des transports en commun après la pandémie (De Haas et al., 2020). Un sondage en ligne dans le but d'évaluer les niveaux de confort des individus et l'utilisation du transport partagé a signalé une diminution de l'utilisation et des niveaux de confort pour les options de mobilité partagée. On s'attendait à ce que les niveaux de confort augmentent après la vaccination, mais ne reviennent pas complètement aux niveaux d'avant la pandémie, variant selon des facteurs sociodémographiques tels que l'âge, le revenu et la race (Kiriazes & Watkins, 2022). Des recherches menées à Toronto à l'aide de la théorie de la motivation en matière de protection ont montré que ceux qui prenaient des mesures de protection plus élevées étaient à l'aise avec une utilisation prudente du transport en commun en adhérant aux politiques de sécurité et en se faisant vacciner. Toutefois, il était peu probable que les personnes qui n'étaient pas à l'aise avec l'utilisation prudente du transport en commun et celles qui évitaient le transport en commun et qui comptaient sur les achats en ligne retournent au transport en commun à l'avenir. Les usagers fréquents du transport en commun avant la COVID ont montré une probabilité plus élevée de continuer à utiliser le transport en commun dans le monde post-COVID (Mashrur et al., 2023). Downey et al. (2022) ont constaté qu'en Écosse, environ un tiers des répondants s'attendaient à moins utiliser l'autobus et le train à la fin de la pandémie et qu'un quart prévoyaient conduire leurs véhicules privés plus fréquemment. Ils ont également constaté que les choix de déplacement avant le confinement, le risque perçu d'infection à la COVID-19, la taille du ménage et la région influençaient considérablement l'utilisation future prévue du transport en commun (Downey et al., 2022).

En ce qui concerne les changements attendus dans les comportements de déplacement, une étude menée à l'aide des données d'un panel à deux vagues a exploré la relation entre les différents niveaux de télétravail et l'utilisation de la voiture privée, du transport en commun, du transport aérien et de l'épicerie en ligne. Les projections post-pandémique comprenaient une augmentation de 30 % de la disponibilité des options de télétravail, 9 % moins d'utilisation de la voiture, 31 % moins d'utilisation du transport en commun et une augmentation du travail hybride et de l'épicerie en ligne (Javadinasr et al., 2022). Une autre étude menée à Toronto a révélé que les personnes qui utilisaient fréquemment la voiture, le transport en commun et les modes actifs avant la pandémie ont une probabilité plus élevée de continuer à utiliser ces modes après la pandémie. Les perceptions à l'égard des modes partagés (comme les perceptions du risque et les préoccupations au sujet de l'infection) auraient également eu une incidence sur les décisions post-pandémiques (Loa & Habib, 2023). Une enquête menée en Grèce en 2021 a exploré le comportement anticipé des passagers du transport en commun après la pandémie. Ils ont étudié

le temps de récupération à savoir la durée pendant laquelle les voyageurs s'abstiennent d'utiliser le transport en commun après la levée des restrictions pandémiques. Des facteurs tels que la fréquence d'utilisation du transport en commun pré-COVID et l'âge ont influencé le temps de récupération. Les travailleurs autonomes et les utilisateurs de véhicules privés étaient moins susceptibles de reprendre l'utilisation du transport en commun. Les attitudes à l'égard de la sécurité liée à la COVID-19 ont également joué un rôle, car ceux qui valorisaient les mesures de protection de la santé étaient moins enclins à retourner au transport en commun (Kopsidas et al., 2021). Deborah et al. (2021) ont étudié les choix post-pandémiques attendus des Américains par rapport à leurs modes de vie prépandémiques. Les résultats montrent une augmentation des attentes en matière de télétravail (de 13 % à 26 %). De plus, plus de 40 % des voyageurs aériens d'affaires prévoyaient réduire la fréquence de leurs voyages, les deux tiers l'attribuant à des mesures efficaces comme la téléconférence. Le transport aérien personnel devrait diminuer, principalement en raison des préoccupations liées à la pandémie. En termes d'épicerie, l'étude a indiqué que 30% des citoyens américains s'attendaient à la faire au moins deux fois par mois après la pandémie, contre 21% avant la pandémie. De plus, 30 % prévoient des promenades plus fréquentes et près de 15 % prévoient faire plus de vélo par rapport aux habitudes d'avant la pandémie (Salon et al., 2021). Dans une autre étude, les chercheurs ont constaté qu'en raison de la pandémie, les usagers réguliers du transport en commun âgés de 18 à 29 ans et les immigrants récents étaient plus susceptibles de passer à la conduite automobile. Les expériences personnelles avec la COVID-19 ou le fait de vivre avec une personne infectée étaient de solides prédicteurs de l'achat d'une voiture et réduisaient l'utilisation future du transport en commun. Leurs résultats suggèrent qu'en Amérique du Nord, la pandémie a renforcé l'attrait de la possession d'une automobile chez les usagers du transport en commun qui étaient déjà prédisposés à acheter des voitures, en particulier chez les jeunes adultes et les immigrants (Palm et al., 2022). Conway et al. (2020) ont interrogé des personnes très scolarisées aux États-Unis pour étudier les habitudes de voyage post-pandémiques. Les résultats ont montré une augmentation de la marche et du vélo, bien que le transport en commun puisse ne pas se rétablir complètement aux niveaux d'avant la pandémie (Conway et al., 2020).

Dans l'ensemble, la plupart des études existantes se sont concentrées sur les effets de la pandémie sur le comportement de déplacement pendant la pandémie, mais la recherche sur les habitudes de déplacement post-pandémique est limitée. Parmi les études qui ont examiné les comportements de déplacement projetés, il y a un manque d'analyses et de prévisions quantitatives. Cette étude vise à combler cette lacune en proposant une approche de pseudo-panel qui offre une anticipation basée sur la typologie de l'achalandage du transport en commun post-COVID. Cependant, il est important de reconnaître que les prévisions peuvent diverger de la réalité observée. En effet, les données post-pandémiques montrent des écarts entre les intentions déclarées et les comportements réels. Cette étude met en lumière les défis méthodologiques et les incertitudes inhérentes aux prévisions. Elle examine en détail la différence entre ce que les gens disent qu'ils feront et ce qu'ils font effectivement. De plus, elle souligne l'importance de prendre en compte les stratégies de télétravail dans la prévision des niveaux de mobilité et d'utilisation des différents modes de transport.

### 2.1.1.3 DONNÉES

Dans le cadre de la présente enquête, plusieurs types de données sont utilisés : les enquêtes origine-destination (OD) de la région de Montréal, les enquêtes sur les impacts de la COVID-19 sur les comportements de mobilité (CTS), les fichiers du recensement canadien, les données décrivant l'offre de transport en commun (GTFS), les données transactionnelles sur le partage de vélos de BIXI et les données transactionnelles sur l'autopartage de Communauto.



L'enquête OD montréalaise vise à capturer les comportements de mobilité et les habitudes de déplacement des individus en utilisant des caractéristiques au niveau de la personne, du ménage et du déplacement. Tous les cinq ans, un groupe d'organismes liés au transport sous la direction de l'ARTM administre un sondage téléphonique et en ligne pour suivre les habitudes de déplacement d'environ 4 % à 5 % des ménages de la grande région de Montréal (GRM) au cours d'un jour de semaine d'automne. Dans cette étude, les deux enquêtes les plus récentes – celles de 2013 et de 2018 auprès respectivement de 78 731 et 75 266 ménages – sont utilisées. Pour s'assurer que les résultats soient représentatifs de la population de référence, les deux enquêtes sont pondérées à l'aide des données du recensement.

CTS vise à étudier les impacts de la COVID-19 sur les comportements de déplacement et les systèmes d'activité des individus avant, pendant et après (comportements anticipés) la pandémie. Cette enquête a été lancée pour la première fois en avril 2020. Deux autres vagues ont été administrées en mai 2021 et en octobre 2022. Les trois vagues du CTS ont été réalisées en ligne à l'aide de la plateforme Evolution (Bourbonnais & Morency, 2013). Au cours des dernières années, cette plateforme a été utilisée pour administrer plusieurs autres sondages en ligne. CTS comprend généralement quatre composantes principales : l'emplacement du domicile et les caractéristiques du ménage, les caractéristiques de la personne, les comportements de déplacement avant et pendant la pandémie et les comportements de déplacement anticipés après la pandémie. Dans la composante liée aux comportements de déplacement post-COVID, les participants ont été interrogés sur les changements attendus dans leurs comportements, tels que la fréquence des déplacements quotidiens, l'utilisation du transport en commun et l'utilisation du vélo après la COVID-19. Dans cette composante, il y avait quatre réponses quant à la fréquence pour chaque mode de transport : ne jamais l'utiliser, l'utiliser moins qu'avant, l'utiliser de la même façon qu'avant et l'utiliser plus qu'avant la pandémie. Les trois vagues de CTS – c'est-à-dire CTS 2020, CTS 2021 et CTS 2022 – ont été achevées par 1620, 936 et 1713 participants, respectivement. Après avoir omis des cas incomplets et s'être concentré sur les enregistrements qui se situent dans les limites géographiques de l'enquête montréalaise, les CTS de 2020, 2021 et 2022 ont donné lieu à 1387, 522 et 1424 observations, respectivement.

Les données sur l'offre en transport ont été recueillies auprès de plusieurs sources. Les fichiers des recensements canadiens de 2011 et de 2016 ont été utilisés pour représenter le réseau routier. Les données du GTFS sur les administrations de transport desservant la GRM ont été utilisées pour évaluer les services de transport en commun prévus pour l'automne 2013 et 2018. De plus, pour les mêmes périodes, les exploitants montréalais de services de vélopartage et d'autopartage, BIXI et Communauto, ont fourni des données transactionnelles sur leurs services, respectivement.

#### *2.1.1.4 MÉTHODOLOGIE*

La méthodologie de cette étude comprend quatre étapes : dans la première étape, les répondants de l'enquête OD sont classés en fonction de leurs caractéristiques sociodémographiques et spatiales. Dans la deuxième étape, les répondants des CTS sont affectés à leurs classifications de l'OD pertinentes. La troisième étape est axée sur la proposition d'une approche pseudo-panel pour analyser le comportement de déplacement de divers types de personnes en termes d'utilisation du transport en commun. La dernière étape prédit l'achalandage des transports en commun après la COVID dans trois scénarios qui tiennent compte de différents niveaux d'impact de la pandémie : impact élevé, impact modéré et impact faible. **Erreur! Source du renvoi introuvable.** propose une représentation schématique de la méthodologie. Les notions de PeTy,

HoTy et NoTy se réfèrent au type de personnes, au type de ménage et au type de quartier, respectivement, et sont empruntées de (Deschaintres et al., 2021).

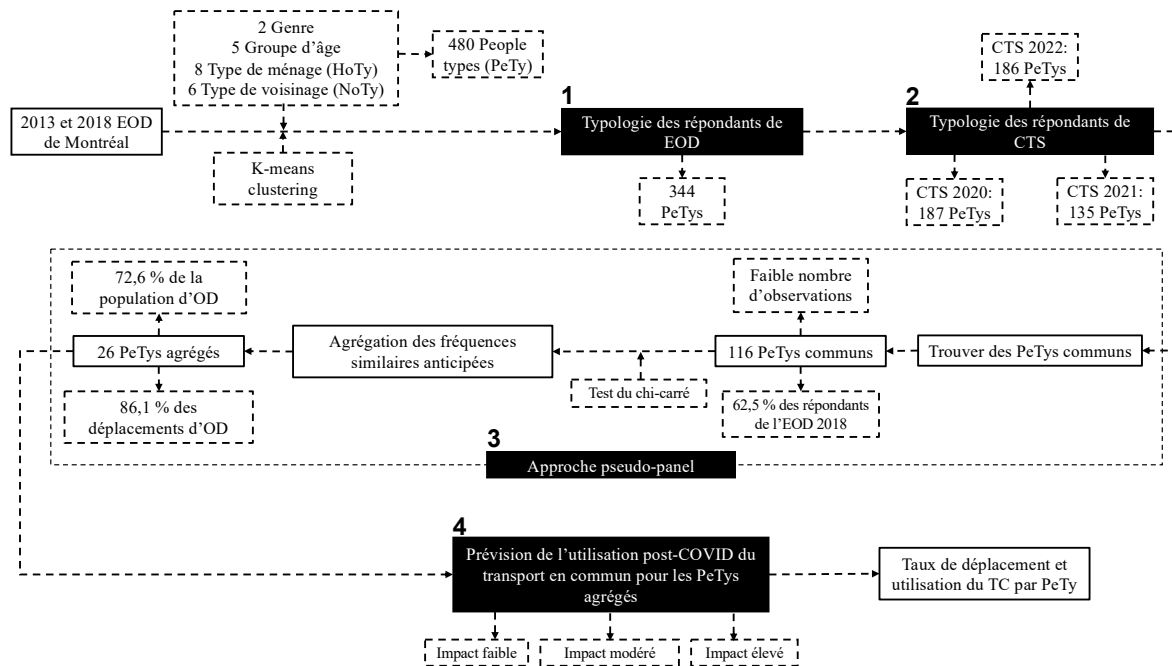


Figure 2-1. Cadre méthodologique

### Typologie des répondants à l'enquête OD

Au cours de la première étape, les répondants aux enquêtes OD de 2013 et de 2018 sont classés en différents types en fonction de quatre caractéristiques principales : le sexe, le groupe d'âge, le type de ménage, les caractéristiques du quartier et les attributs de l'emplacement du domicile. Pour le genre, nous considérons les hommes et les femmes. L'âge des répondants est classé en cinq groupes ([0, 15), [15, 25), [25, 40), [40, 65) et 65 ans et plus). La classification des ménages est basée sur une méthode d'une étude précédente (Fabre & Morency, 2019) qui utilisait un algorithme de regroupement des k-moyennes en utilisant l'âge moyen des membres du ménage, l'amplitude des âges (différence entre le membre le plus âgé et le plus jeune du ménage), la taille du ménage, le nombre d'enfants âgés de 12 ans ou moins et le nombre de membres du ménage entre 76 et 84 ans. La classification des caractéristiques du quartier et des attributs de l'emplacement du domicile s'inspire des travaux de Martel Poliquin (2012) qui a utilisé la technique de regroupement des k-moyennes en fonction des huit variables spatiales suivantes : densité de la population, densité d'emploi, densité commerciale, longueur totale du réseau routier existant, densité des intersections, nombre total de passages-arrêt de transport en commun sur 24h, nombre total points d'ancrage à toutes les stations de vélopartage adjacentes et le nombre total de véhicules dans les stations d'autopartage à proximité (Martel Poliquin, 2012). Notez que dans le calcul de ces huit variables, une zone tampon de 500 mètres autour de du lieu de domicile est utilisée.

### Typologie des répondants du CTS

À la deuxième étape, les répondants du CTS sont classés. Toutes les classes sont identiques à celles des enquêtes OD. Cependant, étant donné que l'échantillon de l'enquête OD est représentatif de la population de la GRM, HoTy et NoTy des répondants CTS sont déterminés en

utilisant les centres des groupes de l'OD qui sont calculés dans la première étape. En d'autres termes, au lieu de classer les répondants des CTS par k-moyennes et de calculer leurs centres de groupes séparément - ce qui, en raison du nombre inférieur d'observations dans les CTS, pourrait éventuellement aboutir à des groupes différents et moins fiables que ceux calculés sur la base des données OD - ils ont été attribués à leurs HoTys et NoTys correspondants en utilisant les centres des groupes prédéterminés (avec les observations de l'OD).

#### Approche pseudo-panel

La troisième étape consiste à proposer une approche pseudo-panel pour analyser le comportement de déplacement de différents types de personnes. Une approche pseudo-panel est une méthode statistique permettant d'analyser les données recueillies auprès de différentes personnes sur différentes périodes afin de créer un ensemble de données de panel synthétique. Les observations individuelles dans un pseudo-panel sont regroupées en fonction d'attributs communs pour former une structure en forme de panel. Dans cette étape, la fréquence de déplacement et l'utilisation du transport en commun pour chaque PeTy sont calculées. En d'autres termes, cette étape utilise la fréquence de déplacement agrégée et l'utilisation du transport en commun pour examiner les changements de comportement de voyage par PeTy plutôt que par individu. Cette agrégation sert également d'outil pour suivre les changements au fil du temps parmi les mêmes PeTys identifiés dans plusieurs enquêtes transversales. À l'aide d'une approche pseudo-panel, quatre ensembles de données transversales pour chaque PeTy allant de 2018 à 2022 sont disponibles. Cela inclut à la fois avant et pendant les périodes COVID-19 qui aident à créer des scénarios et à anticiper les comportements de déplacement post-COVID. Une telle approche est une alternative pertinente aux enquêtes par panel qui sont souvent longues et coûteuses. En outre, les enquêtes longitudinales par panel souffrent de problèmes tels que l'attrition et la non-réponse, et par rapport aux enquêtes transversales, elles couvrent des périodes beaucoup plus courtes et un nombre plus faible de personnes ou de ménages (Mátyás & Sevestre, 2008). Cette approche a été utilisée par Deaton en 1985 dans le but d'estimer un modèle à effets fixes à partir de sections transversales répétées. La méthode qu'il propose regroupe les gens en cohortes en fonction des attributs qu'ils partagent, puis traite les moyennes au sein de ces cohortes comme des observations dans un pseudo-panel (Deaton, 1985).

Il y a 480 PeTys possibles ( $2 \times 5 \times 8 \times 6 = 480$ ) : deux classes pour le sexe, cinq pour l'âge, huit pour HoTy et six pour NoTy. Sur ces 480 PeTys, 344 sont observés dans l'enquête OD 2018. 187, 135 et 186 PeTys sont également observés en 2020, 2021 et 2022 CTS respectivement. En outre, compte tenu des PeTys présents dans les trois vagues de CTS, 116 combinaisons représentent 62,5% des répondants à l'enquête OD 2018. Les PeTys communs des vagues CTS couvrent une bonne partie des répondants OD. Cependant, étant donné que le nombre d'observations dans ces PeTys n'est pas suffisant pour obtenir des informations fiables, les catégories de chaque variable sont agrégées avec celles qui ont une fréquence d'utilisation prévue du transport en commun similaire. Pour trouver les similitudes entre les catégories et évaluer la possibilité d'agrégation, le test du Khi deux est utilisé. Ici, l'hypothèse nulle suggère qu'il n'y a pas de différence significative entre les catégories, donc ne pas la rejeter rend l'agrégation possible. L'hypothèse alternative indique l'existence d'une différence significative entre les deux catégories, rejetant ainsi l'hypothèse nulle inhibe l'agrégation. L'agrégation améliore non seulement le pourcentage de déplacements de DO couverts par CTS PeTys, mais identifie également les catégories qui sont similaires en termes d'utilisation prévue du transport en commun.

#### Prévision basée sur des scénarios de la demande de transport en commun post-COVID

La dernière étape de la méthodologie vise à prédire l'achalandage des transports en commun après la COVID dans trois scénarios : impact élevé, impact modéré et impact faible. Dans le scénario à impact élevé, les répondants qui ont déclaré qu'ils utiliseraient le transport en commun plus qu'avant la pandémie connaissent une augmentation de 100 % du nombre de déplacements qu'ils effectuent en transport en commun ; les déplacements de ceux qui ont le même usage qu'avant la pandémie resteront inchangés ; et les déplacements de ceux dont l'utilisation de la COVID-19 était inférieure à celle d'avant seront réduits de 100 %. Dans les scénarios d'impact modéré et faible, le pourcentage de changements est  $\pm 50\%$  et  $\pm 10\%$ , respectivement. L'examen et la prévision de l'achalandage du transport en commun dans ces scénarios nous permettent de proposer des scénarios de la demande future de transport en commun, scénarios qui seront confrontés aux connaissances actuelles, tout en gardant à l'esprit que ces prévisions peuvent être imprécises.

##### 2.1.1.5 RÉSULTATS

###### Typologie des répondants à l'enquête OD

La typologie des participants aux enquête OD de 2013 et de 2018 est fondée sur les quatre variables susmentionnées. La classification des ménages auxquels appartiennent les répondants conduit à huit HoTys, dont chacun a un nom distinct adopté d'une étude précédente (Fabre & Morency, 2019). Les centres de groupes de ces HoTys ainsi que leur pourcentage de OD sont indiqués dans le Tableau 2-1. Les HoTys du Tableau 2-1 sont classés de la plus grande taille de ménage, les « familles multigénérationnelles », à la plus petite taille de ménage, les « retraités ». Les « familles multigénérationnelles » sont le seul type de ménage qui englobe à la fois les enfants de moins de 12 ans et les personnes âgées de 76 à 84 ans. En revanche, les « familles très jeunes » et les « jeunes familles » ne comprennent que les enfants de moins de 12 ans, tandis que les « adultes et personnes âgées » et les « retraités » ne comprennent que les personnes âgées de 76 à 84 ans. Les trois autres types (« familles traditionnelles », « jeunes couples, célibataires ou colocataires » et « Cinquantenaires ») appartiennent à des ménages sans enfants de moins de 12 ans ou de personnes âgées de 76 à 84 ans. Une autre différence intrigante parmi les HoTys est la présence de compositions générationnelles distinctes au sein de chaque ménage : les « jeunes couples, célibataires ou colocataires », les « Cinquantenaires » et les « retraités » sont des ménages d'une seule génération ; Les « familles très jeunes », les « jeunes familles », les « familles traditionnelles » et les « adultes et personnes âgées » se composent de deux générations ; et les « familles multigénérationnelles » forment des ménages de trois générations.

Tableau 2-1. HoTys et leurs centres de groupes correspondants – Enquêtes OD 2013 et 2018

HoTy	% du total des ménages	Taille de ménage	Âge moyen	Amplitude d'âge	Nombre de membres de ménage âgés de ≤ 12 ans	Nombre de membres de ménage âgés de 76 ≤ 84 ans
1. Familles multigénérationnelles (MGF)	2.2	4.06	41.04	56.60	0.65	0.19
2. Très jeunes familles (VYF)	13.1	4.03	21.09	33.48	1.72	0.00
3. Jeunes familles (YF)	12.6	3.67	31.31	35.74	0.41	0.00
4. Familles traditionnelles (TF)	8.3	2.96	43.50	33.63	0.00	0.00
5. Adultes et personnes âgées (AS)	2.9	2.49	64.85	27.37	0.00	0.40
6. Jeunes couples, célibataires ou colocataires (YCSR)	10.9	1.63	33.44	2.08	0.00	0.00
7. Cinquantenaires (PF)	28.2	1.60	58.34	2.13	0.00	0.00
8. Retraités (RP)	21.9	1.48	75.05	1.72	0.00	0.44

La classification du voisinage des domiciles des ménages se traduit par six NoTys, dont les centres de groupes sont présentés dans le Tableau 2-2 **Erreur! Source du renvoi introuvable.** Selon le Tableau 2-2, on peut en déduire que lorsque nous passons du premier NoTy au dernier, presque toutes les variables ont une tendance à la baisse. En fait, le regroupement des quartiers a donné lieu à un ensemble de six catégories distinctes allant de zones densément peuplées et très accessibles à des zones à faible densité et à de faibles niveaux d'accessibilité. Dans l'ensemble, si l'on considère deux groupes pour le sexe, cinq pour l'âge, huit pour HoTy et six pour NoTy, on constate 480 PeTys possibles, dont 344 sont observés dans l'enquête OD de 2018 et représentent la population cible.

Tableau 2-2. NoTys et leurs centres de groupes correspondants – Enquêtes OD 2013 et 2018

NoTy	Densité de la population	Densité d'emploi	Densité commerciale	Longueur du réseau routier	Densité des intersections	Heures d'arrêt des transports en commun (24h)	Nb de quais de vélopartage	Nb de véhicules d'autopartage
1	10154	9918	3028	14.79	77.73	3304	232.0	21.09
2	9861	2721	1465	12.61	52.06	2395	71.2	8.28
3	5640	1634	918	11.59	52.35	2184	15.5	1.76
4	2968	551	360	11.49	52.69	179	1.3	0.15
5	2102	452	287	8.47	34.82	187	0.6	0.08
6	696	126	67	4.05	12.86	48	0.1	0.01

(Nb: nombre)

### Typologie des répondants du CTS

Au lieu de classer les répondants des vagues CTS indépendamment, ils sont affectés à leurs HoTys et NoTys correspondants basés sur l'OD. La Figure 2-2 présente la répartition des répondants aux différents groupes en fonction de l'âge moyen et de la tranche d'âge des membres de leur ménage. La Figure 2-2 (a) réfère à l'enquête OD et la Figure 2-2 (b) présente les répondants CTS. Nous pouvons observer que l'échantillon du CTS sous-représente les 15 à 25 ans, mais pour le reste des tranches d'âge, le nombre de participants est acceptable.

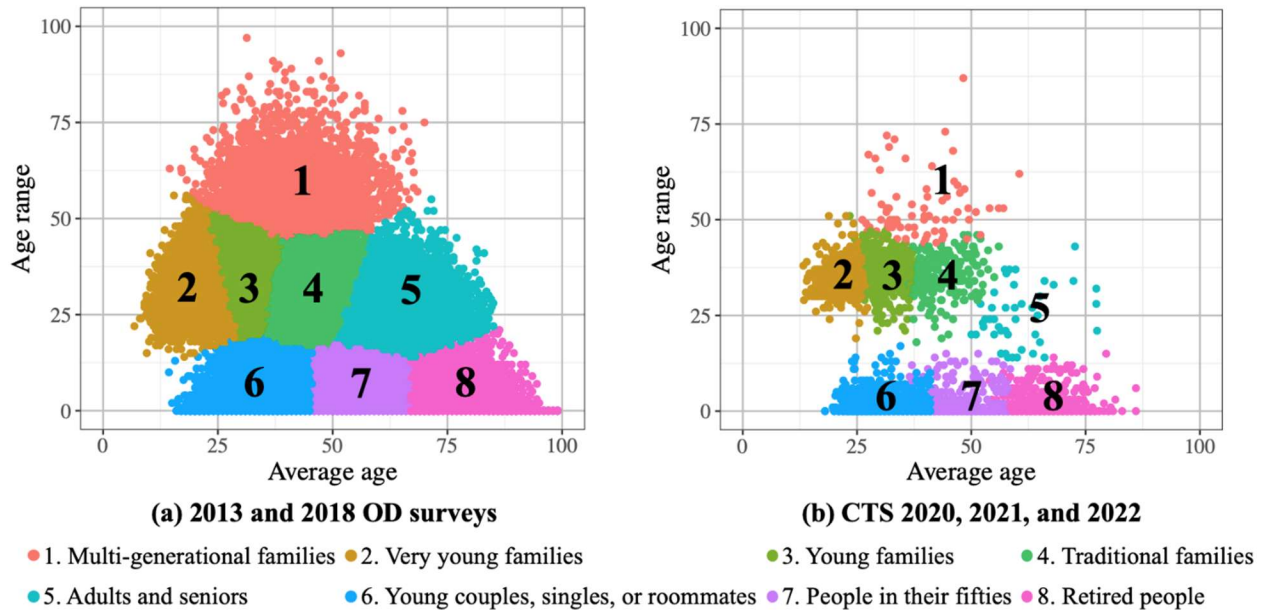


Figure 2-2. Diagramme de dispersion des HoTys OD et CTS selon l'âge moyen et l'amplitude d'âge

La Figure 2-3 (a) et la Figure 2-3 (b) fournissent respectivement la distribution spatiale des répondants OD et CTS autour de la GRM; le pourcentage de chaque NoTy dans OD et CTS est également fourni. Nous observons que les NoTys vont des zones densément peuplées du centre-ville de Montréal aux banlieues. Les ménages situés dans l'île de Montréal sont représentés par les trois premiers NoTys. La population, l'emploi et la densité commerciale dans ces NoTys sont élevées à l'intérieur de 500 mètres de l'emplacement du domicile. Ils offrent des niveaux élevés d'accessibilité à tous les modes de transport, en particulier le réseau de métro et une multitude de lignes d'autobus avec un nombre élevé d'arrêts sur 24 heures. Les modes de transport partagés, comme le partage de vélos et l'autopartage, sont également facilement accessibles. De plus, en raison de leur forte densité d'intersections, ces quartiers sont idéaux pour la marche. Les quatrième et cinquième NoTys représentent la plus grande proportion de ménages, représentant respectivement 24,1% et 28,9% des ménages OD. Ces quartiers se composent principalement de zones résidentielles. NoTy 4 se distingue par un réseau routier bien développé. Bien que la plupart des ménages de ces régions soient situés à l'extérieur des zones desservies par les services partagés, bon nombre d'entre eux ont encore accès à des lignes d'autobus ou de train, en particulier le long des principaux corridors de transport illustrés à la Figure 2-3. Enfin, le type 6 englobe les ménages situés à la périphérie de la GRM, avec un accès limité ou aucun accès à d'autres options de transport outre les véhicules privés.

Sur les 480 PeTys possibles, 187, 135 et 186 sont observés dans les CTS 2020, 2021 et 2022 respectivement. En outre, compte tenu des PeTys communs parmi les trois vagues de CTS conduit



à 116 combinaisons qui englobent 62,5% des répondants à l'enquête OD 2018. Cela correspond à 85 193 personnes sur un total de 136 262 personnes qui ont effectué au moins un déplacement au cours de la journée d'observation.

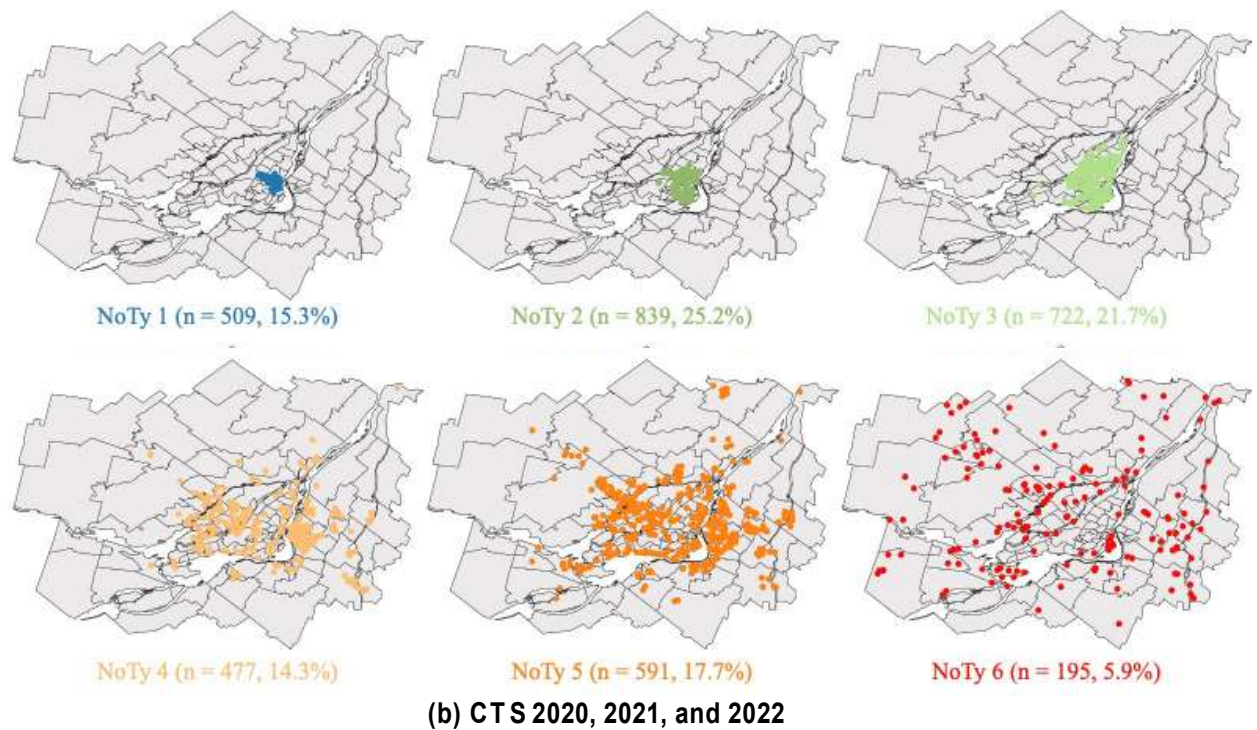
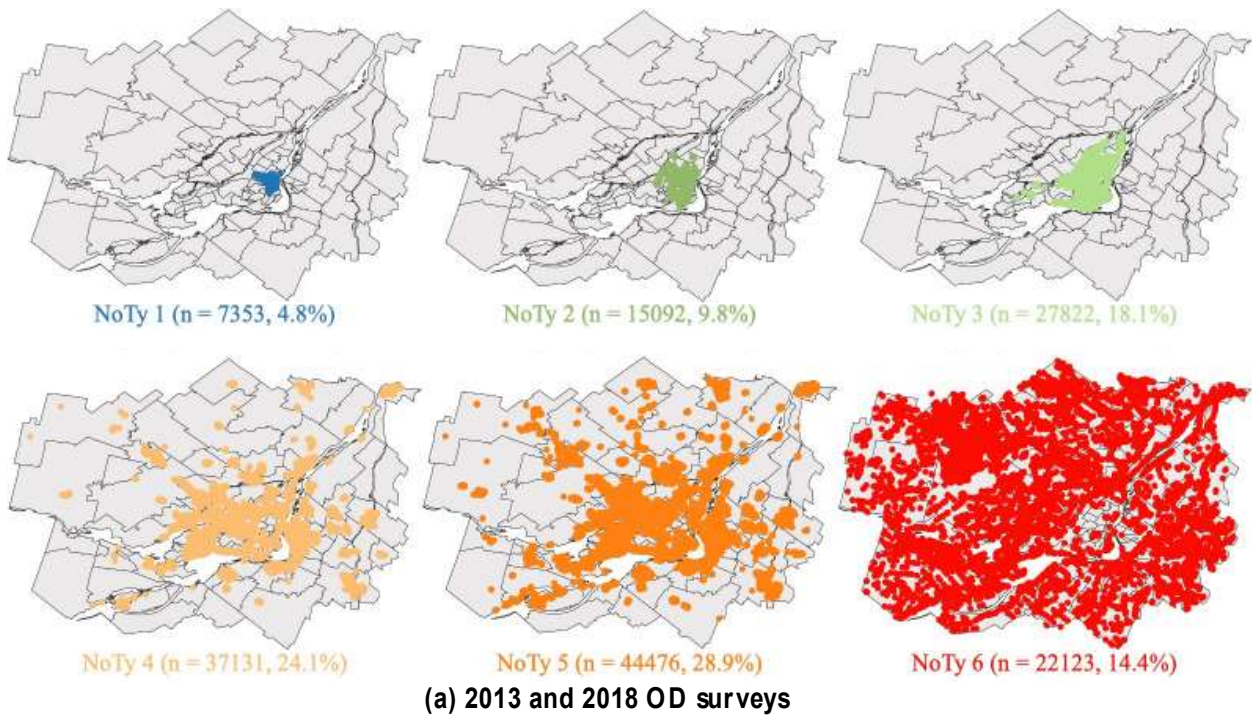


Figure 2-3. Pourcentage de ménages OD et CTS dans chaque NoTy (nD = 153 997, nCTS = 3 333)

### Approche pseudo-panel

La classification des répondants CTS en types permet d'étudier les changements dans les comportements de déplacement en utilisant une approche de pseudo-panel. La période du pseudo-panel de cette étude s'étend de 2018 à 2022 et les attributs communs sont les variables des typologies qui ont été expliquées précédemment. À cette étape, le nombre de déplacements en transport en commun en 2018 pour chacun des 116 PeTys observés dans toutes les enquêtes est calculé à l'aide des données OD. Ensuite, la fréquence moyenne d'utilisation du transport en commun post-COVID prévue de chaque PeTy est obtenue à l'aide des données des vagues CTS. Le fait d'avoir le nombre de déplacements en transport en commun pour chaque PeTys en 2018 ainsi que leur fréquence d'utilisation prévue du transport en commun en 2020, 2021 et 2022, permet d'anticiper le nombre de déplacements en transport en commun post-COVID par PeTy pour ces années. Cependant, étant donné que le nombre d'observations dans plusieurs PeTys courants est insuffisant pour inférer des prédictions fiables, la possibilité d'agréger les PeTys en fonction de la similitude des fréquences d'utilisation du transport en commun est examinée à l'aide du test du Khi deux. En fait, le test du Khi deux est utilisé pour identifier tous les groupes de chaque variable qui sont similaires en termes de distribution de leurs fréquences d'utilisation prévues du transport en commun. Le test du Khi deux est effectué sur toutes les combinaisons binaires possibles des variables de la typologie résultant en la typologie agrégée présentée dans le Tableau 2-3. Les décisions d'agrégation sont prises sur les valeurs de la statistique de test du Khi deux et de la valeur de p. Celles dont la valeur de p est supérieure à 0,05 peuvent être combinées et sont associées à de faibles valeurs de statistiques de test du Khi deux qui indiquent un léger écart entre la distribution des catégories à l'étude. Le test du Khi deux montre une différence significative dans les fréquences d'utilisation prévues du transport en commun entre les hommes et les femmes, ce qui les rend impossibles à agréger. Parmi les catégories de groupes d'âge, les personnes âgées de 15 à 25 ans et de 40 à 65 ans présentent des fréquences d'utilisation prévues du transport en commun similaires, ce qui permet l'agrégation. Le groupe d'âge des moins de 15 ans est exclu en raison du faible nombre d'observations. Les résultats du test du Khi deux pour la possibilité d'agrégation de HoTys confirment la fusion possible des « familles multigénérationnelles » avec des « familles traditionnelles », des « familles très jeunes » avec des « personnes dans la cinquantaine » et des « jeunes familles » avec « des adultes et des personnes âgées ». Les catégories « Jeunes couples, célibataires ou colocataires » et « personnes à la retraite » restent inchangées et se présentent comme des groupes exclusifs. Enfin, en ce qui concerne NoTys, le processus d'agrégation combine les trois premiers et les autres (NoTy 4, 5 et 6) ensemble. Cela crée deux grands groupes: les ménages résidant sur l'île de Montréal et ceux situés à l'extérieur de l'île.

Tableau 2-3. 3 Catégories agrégées de PeTy

Genre	Groupe d'âge	HoTy	NoTy	Combinaisons possibles
Hommes	[15, 25) + [40, 65)	Familles multigénérationnelles + Familles traditionnelles	1 + 2 + 3	2 × 3 × 5 × 2 = 60
Femmes	[25, 40)	Jeunes familles + Adultes et personnes âgées	4 + 5 + 6	
	[65, inf.)	Jeunes couples, célibataires ou colocataires		
		Retraités		



Selon le Tableau 2-3, en tenant compte de deux sexes, trois groupes d'âge, cinq HoTys et deux NoTys on obtient 60 combinaisons possibles, dont 52 sont présentes dans l'enquête OD 2018 et 46, 44 et 52 sont présentes dans les vagues 2020, 2021 et 2022 CTS, respectivement. Compte tenu de ces PeTys qui sont communs parmi l'OD et les vagues CTS, on obtient 42 combinaisons. En omettant les PeTys avec moins de cinq observations (12 PeTys) et en supprimant celles avec un faible pourcentage de la population OD (quatre PeTys), on obtient 26 PeTys qui couvrent 86,1% des déplacements et 72,6% de la population de l'enquête OD de 2018. Ces PeTys agrégés sont utilisés afin de prédire la demande de transport en commun post-COVID.

#### Prévision basée sur des scénarios de la demande de transport en commun post-COVID

La dernière partie des résultats concerne la prévision de la demande totale de transport en commun de PeTys agrégés dans trois scénarios qui sont basés sur différents niveaux d'impact de la COVID-19 sur l'achalandage du transport en commun : scénario d'impact élevé, scénario d'impact modéré et scénario à faible impact. Comme indiqué précédemment, il existe quatre options pour les répondants du CTS en ce qui concerne la question liée à leur fréquence d'utilisation prévue du transport en commun post-COVID. Ces options sont : jamais, moins qu'avant la pandémie, autant qu'avant la pandémie, et plus qu'avant la pandémie. Nous avons attribué une valeur à chacune de ces options : -1 pour moins qu'avant, 0 pour jamais et même qu'avant, et +1 pour plus qu'avant la pandémie. En utilisant ces fréquences prévues, nous avons calculé la fréquence moyenne d'utilisation du transport en commun par PeTy dans chacune des vagues CTS. En d'autres termes, il y a trois fréquences d'utilisation prévues du transport en commun pour chaque PeTy qui est basé sur les trois vagues du CTS. Dans les trois scénarios, l'utilisation du transport en commun par ceux qui ont déclaré qu'ils utiliseraient le transport en commun de la même manière qu'auparavant ou qu'ils ne l'utiliseraient jamais reste inchangée et égale à ses valeurs antérieures à la COVID (c.-à-d. l'utilisation du transport en commun extraite de l'OD 2018). Cependant, l'utilisation du transport en commun par les répondants qui ont déclaré qu'ils utiliseraient le transport en commun moins (plus) qu'avant la pandémie connaîtra un certain pourcentage de diminution (augmentation) selon le scénario à l'étude. Le pourcentage de variation dans les scénarios d'impact faible, modéré et élevé est  $\pm 10$ ,  $\pm 50$  et  $\pm 100$ , respectivement. Ces hypothèses permettent d'estimer l'utilisation du transport en commun de chaque PeTy en fonction des fréquences d'utilisation prévues du transport en commun dans trois sections transversales de 2020, 2021 et 2022. Ces estimations prennent l'achalandage du transport en commun de chaque PeTy en 2018 comme référence, puis estiment leur achalandage du transport en commun dans trois scénarios basés sur les données du CTS en 2020, 2021, 2022. La somme de l'utilisation du transport en commun de tous les PeTys donne l'achalandage total du transport en commun pour l'année mentionnée, ce qui est illustré à la Figure 2-4. Selon la Figure 2-4 on estime que l'utilisation du transport en commun en 2020 diminuera, allant de 61,52 % de son niveau d'avant la COVID selon le scénario à impact élevé à 96,15 % de celui-ci selon le scénario à faible impact. Ces estimations se traduisent par un taux d'utilisation entre 77,24% et 97,72% des niveaux de 2018 en 2021. Pour 2022, les calculs donnent une fourchette d'achalandage du transport en commun entre 87,02 % et 98,70 % selon des scénarios à impact élevé et faible, respectivement. En plus d'estimer l'achalandage du transport en commun en 2020, 2021 et 2022 en utilisant les fréquences d'utilisation déclarées du transport en commun des personnes qui proviennent des vagues CTS, nous prévoyons également l'utilisation du transport en commun de chaque PeTy de 2023 à 2025 en fonction de leur utilisation déclarée de 2020 à 2022. À cette fin, nous avons ajusté un modèle de régression linéaire aux trois pourcentages d'utilisation du transport en commun de chaque PeTy en 2020, 2021, 2022. En utilisant les modèles de régression

linéaire estimés, nous prévoyons l'utilisation future du transport en commun de chaque PeTy en 2023, 2024 et 2025. Par la suite, la somme de toutes les utilisations prévues est calculée et tracée à la Figure 2-4 pour les trois scénarios.

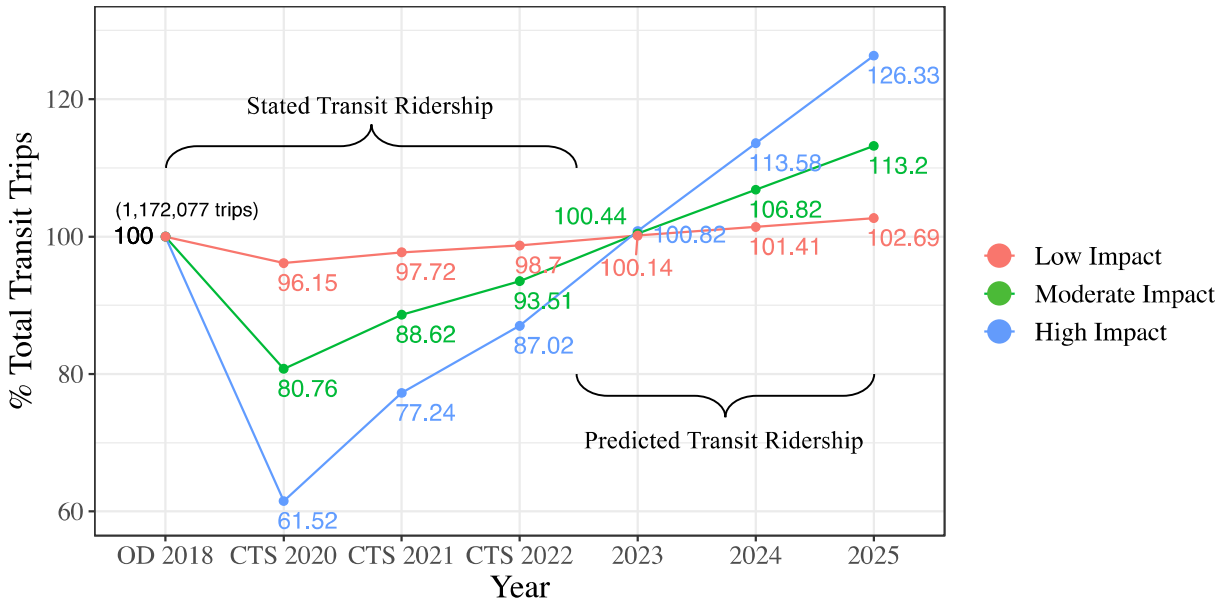


Figure 2-4. Prédiction du nombre total de déplacements en TC des PeTys agrégés selon trois scénarios

Selon les prévisions, l'achalandage du transport en commun devrait se rétablir graduellement et atteindre environ 100 % de ses niveaux d'avant la COVID dans les trois scénarios. En outre, on s'attend à ce qu'il continue de croître au-delà de ce point. En 2024, il connaîtra une augmentation allant de 1,41% à 13,58% et en 2025, il atteindra un maximum de 26,33% d'augmentation et un minimum de 2,69% d'augmentation. Les valeurs d'achalandage du transport en commun prévues plus élevées appartiennent au scénario d'impact élevé. Bien que la réduction soit plus élevée aux premiers stades de la COVID-19, elle conduit à des modèles de régression linéaire avec des pentes plus élevées et donc des taux de croissance plus rapides. Il est important de souligner que, bien que nous ayons présenté la demande globale de transport en commun prévue pour les années à venir, toutes les prévisions sont évaluées au niveau agrégé de PeTys, et elles peuvent également être déclarées en termes de taux de transport en commun par PeTy. Le Tableau 2-4 présente les taux de déplacement prévus des 26 PeTys agrégés de 2020 à 2025.

Tableau 2-4. Taux de déplacement prévus de PeTys agrégés (TD: Taux de Déplacement)

#	PeTy	% depl. OD	% pop OD	TD18	Scénarios impacts importants					
					TDR20	TD21	TD22	TD23	TD24	TD25
1	Femmes, [15, 25) + [40, 65), VYF + PF, 4 + 5 + 6	3.35	6.21	0.165	0.096	0.153	0.153	0.191	0.219	0.247
2	Hommes, [15, 25) + [40, 65), VYF + PF, 4 + 5 + 6	2.76	5.98	0.141	0.086	0.094	0.131	0.148	0.170	0.192
3	Hommes, [15, 25) + [40, 65), YF + AS, 4 + 5 + 6	5.59	5.88	0.290	0.179	0.194	<u>0.223</u>	0.243	0.265	<u>0.287</u>
4	Femmes, [15, 25) + [40, 65), YF + AS, 4 + 5 + 6	6.25	5.70	0.335	0.227	0.265	0.289	0.322	0.353	0.384
5	Femmes, [65, inf), RP, 4 + 5 + 6	1.16	4.85	0.073	0.056	0.073	<b>0.084</b>	0.099	0.113	<b>0.127</b>
6	Femmes, [15, 25) + [40, 65), MGF + TF, 4 + 5 + 6	3.27	3.80	0.263	0.178	0.158	0.244	0.260	0.293	0.326
7	Hommes, [15, 25) + [40, 65), MGF + TF, 4 + 5 + 6	2.44	3.52	0.212	<u>0.165</u>	0.231	0.196	0.229	0.245	0.261
8	Hommes, [65, inf), RP, 4 + 5 + 6	0.40	3.50	0.035	<u>0.030</u>	0.037	0.034	0.038	0.039	0.041
9	Femmes, [25, 40), VYF + PF, 4 + 5 + 6	1.46	3.17	0.141	0.082	0.106	<u>0.103</u>	0.118	0.128	<u>0.139</u>
10	Hommes, [25, 40), VYF + PF, 4 + 5 + 6	1.39	2.50	0.170	0.095	0.113	0.161	0.189	0.222	0.255
11	Hommes, [25, 40), YCSR, 1 + 2 + 3	7.36	2.49	0.902	0.633	0.714	0.760	0.829	0.893	0.957
12	Hommes, [15, 25) + [40, 65), VYF + PF, 1 + 2 + 3	4.47	2.44	0.559	0.308	0.461	0.501	0.617	0.714	0.811
13	Femmes, [15, 25) + [40, 65), VYF + PF, 1 + 2 + 3	4.93	2.30	0.656	<b>0.328</b>	0.506	0.525	0.651	0.750	0.848
14	Hommes, [15, 25) + [40, 65), YF + AS, 1 + 2 + 3	4.98	2.19	0.695	<b>0.278</b>	0.487	0.567	0.733	0.877	1.022
15	Femmes, [65, inf), RP, 1 + 2 + 3	2.26	2.15	0.320	<u>0.276</u>	0.262	0.296	0.298	0.307	<u>0.317</u>
16	Femmes, [25, 40), YCSR, 1 + 2 + 3	7.22	2.12	1.040	<b>0.490</b>	0.657	0.951	1.160	1.391	1.622
17	Femmes, [15, 25) + [40, 65), YF + AS, 1 + 2 + 3	5.88	2.12	0.847	0.529	0.706	0.728	0.853	0.952	1.051
18	Hommes, [25, 40), YCSR, 4 + 5 + 6	1.59	2.02	0.241	0.152	0.197	<b>0.253</b>	0.301	0.352	<b>0.402</b>
19	Femmes, [25, 40), YCSR, 4 + 5 + 6	1.51	1.66	0.278	0.173	0.185	0.263	0.297	0.342	0.387
20	Femmes, [25, 40), VYF + PF, 1 + 2 + 3	3.00	1.40	0.655	0.407	0.328	0.566	0.593	0.672	0.751
21	Hommes, [65, inf), RP, 1 + 2 + 3	1.17	1.35	0.264	0.185	0.340	<b>0.309</b>	0.401	0.463	<b>0.525</b>
22	Femmes, [15, 25) + [40, 65), MGF + TF, 1 + 2 + 3	3.10	1.25	0.758	0.505	0.758	<u>0.561</u>	0.664	0.692	<u>0.720</u>
23	Hommes, [15, 25) + [40, 65), MGF + TF, 1 + 2 + 3	2.18	1.09	0.612	0.374	0.510	0.489	0.573	0.631	0.689
24	Hommes, [25, 40), VYF + PF, 1 + 2 + 3	2.26	1.00	0.687	0.458	0.644	0.573	0.673	0.730	0.787
25	Hommes, [15, 25) + [40, 65), YCSR, 1 + 2 + 3	2.69	0.99	0.832	0.587	0.499	0.765	0.795	0.884	0.973
26	Femmes, [15, 25) + [40, 65), YCSR, 1 + 2 + 3	3.46	0.92	1.144	0.711	0.858	0.916	1.033	1.135	1.237

Selon le Tableau 2-4, tous les PeTys en 2020 ont des taux de déplacement inférieurs à ceux de 2018. Parmi eux, 13, 14 et 16 PeTys présentent les réductions les plus importantes, tandis que 7, 8 et 15 PeTys montrent les plus petites réductions par rapport à celles de 2018. Bien que tous les PeTys en 2022 aient des taux de voyage inférieurs à ceux de 2018, les PeTys 5, 18 et 21 ont des valeurs supérieures à leurs niveaux de 2018. De plus, les PeTys 3, 9 et 22 ont la plus forte réduction par rapport à 2018. Les valeurs prévues pour 2025 indiquent qu'à l'exception de 3, 9, 15 et 22, tous les PeTys auront des taux de déplacement supérieurs à leurs niveaux de 2018. Cette année, PeTys 5, 18, et 21 devraient avoir les taux de déplacement les plus élevés.

#### 2.1.1.6 CONCLUSION

Cette enquête a proposé une approche de pseudo-panel pour aider à prévoir l'utilisation du transport en commun des gens en fonction de leurs caractéristiques et de leurs comportements de déplacement à partir d'un ensemble d'enquêtes transversales menées avant et pendant la COVID-19. À cette fin, les individus ont été regroupés en types à l'aide de personnes, de ménages et de caractéristiques de quartier. Ensuite, pour chaque type, les changements dans leur utilisation actuelle et prévue du transport en commun en termes de fréquence ont été analysés au fil du temps. Compte rendu de la fréquence d'utilisation de chaque type de personnes, trois scénarios de comportement de déplacement ont été proposés pour évaluer les niveaux plausibles d'achalandage du transport en commun pour les années à venir. Cela donne un aperçu d'une gamme possible de niveaux d'achalandage. Il montre également comment valoriser les enquêtes à faible échantillon afin de réduire la nécessité de mener des enquêtes à grande échelle pour certaines cohortes de la population. Grâce à l'analyse et à la prédiction de l'achalandage des transports en commun après la COVID, les chercheurs et les praticiens peuvent obtenir une compréhension holistique de la demande potentielle de transport en commun. Les résultats peuvent ensuite être utilisés pour éclairer la prise de décisions, faciliter le processus de planification et faciliter l'affectation efficace des ressources au sein de l'industrie du transport en commun.

Bien que l'achalandage du transport en commun des personnes ait chuté jusqu'à 60 % de ses niveaux d'avant la COVID en 2020, le modèle suggère qu'elle pourrait progressivement se rétablir et atteindre presque 100 % de son niveau pré-COVID en 2023 dans les trois scénarios. De plus, le modèle prédit que cette croissance pourrait persister au-delà de ce point. En 2024, il y aurait une croissance allant de 1,41% à 13,58% alors que jusqu'en 2025, l'augmentation varierait d'un minimum de 2,69 % à un maximum de 26,33 %. Cependant, nous savons que cela ne correspond pas à la situation actuelle, car l'achalandage des transports en commun est d'environ 85% de son niveau pré-COVID en 2023. Plusieurs facteurs peuvent expliquer les différences entre la situation actuelle et les scénarios construits avec la modélisation réalisés. Il est possible que les gens n'aient pas adopté les comportements de déplacement qu'ils pensaient adopter. Il est aussi possible que les impacts du télétravail ne soient pas correctement considérés (tant par les répondants aux enquêtes que par les paramètres choisis pour les scénarios). Les résultats de cette étude ont néanmoins permis de déterminer les cohortes de population qui devraient connaître les changements les plus importants et les moins importants dans l'utilisation du transport en commun.

La nature qualitative de la fréquence prévue d'utilisation du transport en commun des personnes interrogées auprès des répondants du CTS est une limite de cette recherche. Bien qu'il demeure difficile pour les participants de prévoir leur nombre futur de déplacements en transport en commun, il serait avantageux de concevoir un questionnaire capable de surmonter cet obstacle. Les travaux futurs se concentreront sur la résolution des limites. De plus, l'analyse des données

des cartes à puce pour obtenir des niveaux d'achalandage des transports en commun avant, pendant et après la COVID-19 est une avenue pour d'autres recherches. Elles peuvent être utilisées pour comparer les prédictions de cette recherche avec l'utilisation réelle du transport en commun des individus à mesure qu'elles deviennent disponibles. La réalisation d'enquêtes ultérieures après la pandémie peut également fournir des informations plus récentes sur les comportements de voyage des individus.

## 2.1.2 Vulnérabilité des réseaux de transport en commun

Par : Kaveh Rezvani, doctorat

Supervision : Pre Catherine Morency

Contexte : Chaire Mobilité / Transition

Fin prévue : décembre 2024

### 2.1.2.1 Introduction

Dans les transports urbains contemporains, les métros sont cruciaux pour la mobilité urbaine, mais les interruptions de services peuvent provoquer un chaos important. Les accidents, les incidents, les événements et les intempéries perturbent typiquement les systèmes de métro dans le monde entier. Par exemple, entre 2014 et 2018, le métro de Pékin a connu 408 perturbations (Liu, Zhu et al. 2021), Toronto en comptait 144 en 2015 (Itani et Shalaby 2021) et Montréal a enregistré 769 perturbations entre 2019 et 2022 (Ville de Montréal). Les opérateurs de métro utilisent diverses stratégies pour atténuer les interruptions, telles que l'ajustement des horaires ou la fourniture de services de bus de remplacement (Zhang, Lo et al. 2021). Cependant, il peut être difficile de faire face aux perturbations à court terme, certaines étant résolues avant la mise en œuvre des mesures de mitigation. Dans de tels cas, les services de bus réguliers jouent un rôle crucial. Malgré des recherches approfondies sur les interruptions dans les réseaux de métro, il y a un manque d'études sur les interruptions de courte durée et la façon dont les services réguliers permettent de les mitiger. Des recherches antérieures se sont concentrées sur des mesures d'atténuation innovantes, mais négligent souvent leur pertinence pour les perturbations de courte durée. De plus, il existe une lacune dans l'évaluation de l'efficacité des services de transport en commun réguliers pour atténuer les interruptions de services dans le métro. Pour combler ces lacunes, cette recherche propose une approche pour évaluer la qualité des services d'autobus réguliers lors d'interruptions de courte durée dans le métro, en se concentrant sur le réseau de Montréal. Cette approche peut être appliquée à divers réseaux et modes de transport alternatifs. Les principaux objectifs de cette recherche sont les suivants :

- Estimer la proportion de déplacements qui ne sont pas affectés par les interruptions de services, en tenant compte à la fois des choix d'itinéraire et de mode, selon divers scénarios de perturbation.
- Évaluer l'efficacité des services d'autobus réguliers pour maintenir la qualité des déplacements en cas d'interruptions du service de métro.
- Prévoir le surplus de temps de déplacement encouru lors de l'utilisation des services d'autobus réguliers pendant les interruptions du service de métro.

### 2.1.2.2 Revue de littérature

La recherche sur l'importance des systèmes de métro dans le transport urbain a conduit à des études sur l'impact des perturbations, la vulnérabilité et l'analyse de la résilience. La théorie des réseaux complexes est utilisée pour identifier les segments critiques dans les réseaux métropolitains, comme le modèle de potentiel topologique prenant en compte l'entropie (ITPE) à Shenzhen (Du, Tang et al. 2020), et Théorie des Réseaux Complexes (CNT) à Athènes (Kopsidas et Kepaptsoglou 2022). Certaines études intègrent les réseaux de bus et de métro pour explorer la robustesse du système de transport public (Ma, Shi et al. 2020). D'autres se concentrent sur les mesures d'atténuation, comme l'optimisation de la gestion des perturbations dans les systèmes de transport locaux (Malucelli et Tresoldi 2019) ou des formulations de type mixte pour gérer les interruptions (Huang, Mannino et al. 2020). Alors que des mesures d'atténuation internes sont explorées, des mesures externes, en particulier des services de substitution d'autobus ou des « ponts d'autobus » - introduites par Kepaptsoglou et Karlaftis (2009) - reçoivent une attention

particulière. Des modèles de planification des services alternatifs de bus, comme le modèle de programmation en nombres entiers non linéaires pour le métro de Shanghai (Hu, Gao et al. 2016), ou des approches de sélection des lignes et des fréquences de navette dans les limites du budget (Van der Hurk, Koutsopoulos et al. 2016), ont été proposés et mis en œuvre

Malgré des recherches approfondies, il y a peu d'études sur les interruptions de courte durée, sans seuil spécifique identifié pour les différencier (des longues interruptions). Les études existantes se concentrent souvent sur les interruptions de moyenne et longue durée, avec une attention limitée portée aux interruptions de courte durée. Certains opérateurs de métro fixent empiriquement des seuils, au-delà desquels des mesures d'atténuation spécifiques sont mises en œuvre. Cependant, il n'existe aucune recherche évaluant l'efficacité des services de transport en commun réguliers pour atténuer les impacts des courtes interruptions de service de métro ou établissant une relation logique entre l'ampleur des perturbations et le temps de déplacement excédentaire des utilisateurs. Il est essentiel de combler ces lacunes pour améliorer la robustesse du réseau de métro et l'efficacité générale des réseaux de transport urbain.

### *2.1.2.3 Approche méthodologique*

Cette étude présente un cadre en cinq étapes pour évaluer l'efficacité du service d'autobus régulier dans la gestion des perturbations dans les réseaux de métro. Dans un premier temps, nous collectons des données GTFS et OD pour représenter l'offre et la demande de déplacements. Ensuite, à l'aide de la plateforme Transition, nous calculons les temps de déplacement en conditions normales de réseau. Par la suite, en utilisant la stratégie de défaillance basée sur les blocs, nous définissons des interruptions hypothétiques en fonction de l'importance de la station et des interruptions passées, en simulant divers scénarios et en réaffectant les déplacements sur le réseau toujours fonctionnel. Ensuite, nous classons les alternatives d'itinéraires à l'aide de seuils introduits en fonction des temps de déplacement dans chaque scénario. Enfin, nous modélisons les résultats pour comprendre la relation entre l'ampleur des interruptions, le temps de déplacement excédentaire et le pourcentage de la demande satisfaite pour différents seuils de qualité. Ce cadre adaptable offre une approche structurée pour évaluer la complémentarité du service d'autobus régulier pendant les interruptions du métro, aidant les planificateurs du transport urbain dans les processus de prise de décision.

#### **Étape 1 : Collecte des données**

Pour exécuter ce cadre, il est essentiel d'acquérir des données relatives à l'offre, y compris les itinéraires, les stations et les détails opérationnels tels que les espacements, la vitesse opérationnelle, etc. pour le métro et le(s) mode(s) complémentaire(s) (le système d'autobus dans cette recherche), ainsi que des informations pertinentes sur la demande de déplacements. Les meilleurs choix pour ces exigences sont les fichiers GTFS, publiés par les opérateurs de services, pour les premiers et les matrices OD pour les seconds. Il convient de préciser que pour obtenir des résultats précis, seuls les déplacements effectués exclusivement par le métro et les déplacements effectués par une combinaison du métro et de l'autobus sont étudiés.

#### **Étape 2 : Affectation d'itinéraire et calcul du temps de déplacement à l'état normal**

Après avoir recueilli les données et créé des modèles pour les réseaux de transport en commun, l'étape suivante consiste à affecter les déplacements en transport en commun et à calculer leurs temps de déplacement. Dans ce processus, nous avons utilisé la Plateforme Transition, un logiciel libre développé à Polytechnique Montréal. Cette plateforme utilise l'algorithme de balayage de connexion (CSA) pour générer des alternatives de transport en commun. Pour déterminer le temps de déplacement total pour chaque déplacement, nous prenons en compte la somme du temps total en véhicule, du temps d'attente total, du temps d'accès et de sortie et du temps de

marche de correspondance (le cas échéant). De plus, avant l'affectation des déplacements, trois paramètres, à savoir le temps de déplacement maximal d'accès et de sortie, le temps de déplacement maximal d'accès et le temps de première attente maximum, doivent être initialisés. Le nombre total de déplacements est noté  $D_{Total}$ .

### Étape 3 : Simulation d'interruptions et définition des scénarios de défaillance

Cette étape constitue le cœur de la recherche, composée de trois grandes phases :

Dans un premier temps, l'adoption d'un mécanisme de défaillance est nécessaire, en choisissant parmi les stratégies disponibles telles que les stratégies de défaillance basées sur les nœuds, les liaisons ou les blocs. Compte tenu de la compatibilité de la stratégie de défaillance basée sur les blocs (BBFS) avec les réseaux métropolitains, elle est utilisée dans cette étude. Pour mettre en œuvre BBFS, il est crucial de comprendre qu'un bloc comprend plusieurs stations régulières consécutives positionnées entre deux stations avec des installations permettant le changement de direction des trains (SDCF). Par conséquent, après BBFS, si une station régulière est perturbée, tout le bloc auquel elle appartient sera non-disponible. De même, si l'un des SDCF est perturbé, tous les blocs qui y sont connectés seront également non-disponibles. La Figure 2-7 fournit plus de détails dans ce contexte. Il est à noter que chaque ligne de métro se compose de deux voies (par exemple, Nord et Sud ou Est et Ouest). Par conséquent, lors du codage de l'algorithme BBFS, il faut tenir compte de l'existence de deux types de SDCF dans les réseaux métropolitains urbains (UMN) : les SDCF entièrement équipés avec des installations de changement de direction intégrées pour les deux voies, et les SDCF semi-équipés fournissant des installations de changement de direction pour une seule voie.

Après avoir identifié la stratégie de défaillance appropriée, l'étape suivante consiste à définir différents scénarios de perturbation. Cela implique de supposer des perturbations dans différentes stations de métro et de simuler ces perturbations. Ces stations peuvent être sélectionnées au hasard ou selon des règles. Dans le cadre de cette recherche, nous mettons l'accent sur les perturbations ciblées selon deux approches : la sélection des stations fondée sur l'importance de la station et la sélection des stations fondée sur la fréquence historique des perturbations rencontrées à la station. Tous les scénarios définis, dans lesquels différentes étendues d'interruption dans le réseau de métro sont observées, doivent être simulés.

Dans les scénarios simulés, tous les déplacements sont affectés sur des réseaux modifiés et de nouveaux itinéraires sont obtenus, lorsque faisables. Après l'affectation des déplacements sous des réseaux perturbés, les déplacements sont classés en trois groupes distincts : les déplacements utilisant le même itinéraire qu'avant la perturbation (TUSRBD), les déplacements dont le nouveau trajet ne respecte pas le critère minimal de qualité (TSS) et les déplacements qui empruntent un nouveau trajet qui respecte le critère minimal de qualité (TUA).

### Étape 4 : Évaluation de la qualité des trajets alternatifs

Dans les régions métropolitaines, on s'attend à ce qu'en cas de perturbations partielles ou même complètes du système de métro, la majorité des déplacements aient toujours des itinéraires alternatifs dans le réseau de transport en commun. Néanmoins, il convient de noter que tous les déplacements ne possèdent pas de trajet alternatif caractérisé par une qualité équivalente ou presque équivalente à l'itinéraire le plus rapide utilisé avant la perturbation. Parfois, l'augmentation du temps de déplacement atteint un point où on peut supposer que les usagers ne soient plus disposés à utiliser le système de transport en commun. Ce point peut varier selon les utilisateurs et les situations. Par conséquent, il est utile d'établir des seuils qui peuvent être



appliqués pour déterminer si les utilisateurs seraient enclins ou non à utiliser le transport en commun malgré la modification de leur trajet.

Dans cette recherche, nous introduisons un indicateur utilisé pour définir le seuil de qualité des alternatives. Cet indicateur montre la proportion du temps de déplacement du déplacement  $K_i$  dans chaque scénario et à l'état normal :

$$K_i^S = \frac{ADTT_i^S}{BDTT_i}$$

Où  $ADTT_i^S$  représente le temps de déplacement de l'alternative la plus rapide pour le déplacement dans le scénario  $S$ ,  $i$  représente le numéro du déplacement, avec des valeurs allant de 1 à  $D_{Total}$ .  $S$  représente le numéro du scénario, et  $BDTT_i$  représente le temps de déplacement du déplacement  $i$  à l'état normal. Il est évident que si la perturbation ne modifie pas l'itinéraire du déplacement  $i$ , le temps de déplacement reste constant avant et après la perturbation, le ratio sera donc égal à 1. Cependant, si la perturbation a une incidence sur le choix de l'itinéraire, il est possible que son temps de déplacement change, probablement qu'il soit plus long. Si on fixe le seuil à  $K_i \leq 1.1$  on suppose qu'un usager acceptera une augmentation maximale de temps de 10 %.

La demande satisfaite lorsque  $K_i \leq 1.1$  est représentée par  $SD_{1.1}$  et le surplus de temps de déplacement est indiqué par  $\tau_{1.1}$ . Dans cette recherche, nous définissons cinq seuils de qualité ( $K_i \leq 1.5$ ,  $K_i \leq 1.75$ ,  $K_i > 1.75$ ), et il est évident que  $SD_{1.1} \subset SD_{1.25} \subset SD_{1.5} \subset SD_{1.75} \subset SD_{all}$  et  $\tau_{1.1} \leq \tau_{1.25} \leq \tau_{1.5} \leq \tau_{1.75} \leq \tau_{all}$ . Le pourcentage de la demande satisfaite à la suite de l'application de chaque seuil dans chaque scénario, représenté par  $SD$  (%), est calculé en utilisant la formulation suivante :

$$SD (\%) = \frac{|SD|}{D_{Total}} \times 100$$

De plus, le surplus de temps de trajet ( $\tau$ ) lorsque chaque seuil de qualité est appliqué est calculé en utilisant la formulation ci-dessous :

$$\tau = \frac{ATT_{N,S} - ATT_{\square}}{ATT_{N,S}} \times 100$$

Où :  $ATT_{N,S}$  montre le temps de déplacement moyen à l'état normal,  $ATT_{\square}$  représente le temps de déplacement moyen des déplacements atteignant le seuil de qualité (dans les scénarios de défaillance).

#### Étape 5 : Modélisation des résultats

Étant donné que les modèles de régression représentent une classe importante de modèles mathématiques qui servent généralement de cadre de base à de nombreux autres types de modèles (Lee, Im et al. 2023), dans cette recherche, nous utilisons des modèles de régression pour nos processus de prédiction. Des modèles plus complexes pourront éventuellement être testés. Par conséquent, en considérant « l'ampleur de la perturbation dans le réseau de métro » comme facteur explicatif, nous utilisons des modèles de régression pour prédire à la fois la « demande satisfaite après l'application de chaque seuil de qualité » et le « surplus de temps de déplacement causé par l'utilisation de trajets alternatifs après l'application de chaque seuil de qualité ». Dans ces modèles, le nombre d'observations correspond au nombre de scénarios simulés. Par

conséquent, plus le nombre de scénarios de défaillance simulés est important, plus le modèle devrait être précis.

#### 2.1.2.4 Mise en œuvre du cadre

##### Étude de Cas

L'étude est centrée sur la région métropolitaine de Montréal, reconnue comme le deuxième plus grand centre de population au Canada, avec une population de 4,3 millions d'habitants. Comme l'indique la Figure 2-5, le réseau de métro à l'étude comprend quatre lignes, 68 stations et une longueur estimée à 70 km, ce qui en fait le deuxième plus grand réseau de métro au Canada. Chaque jour, 1,2 million de déplacements en métro sont enregistrés dans ce vaste réseau (CityTransit 2022). De plus, la région examinée est desservie par trois opérateurs d'autobus : la STM, la STL et le RTL.

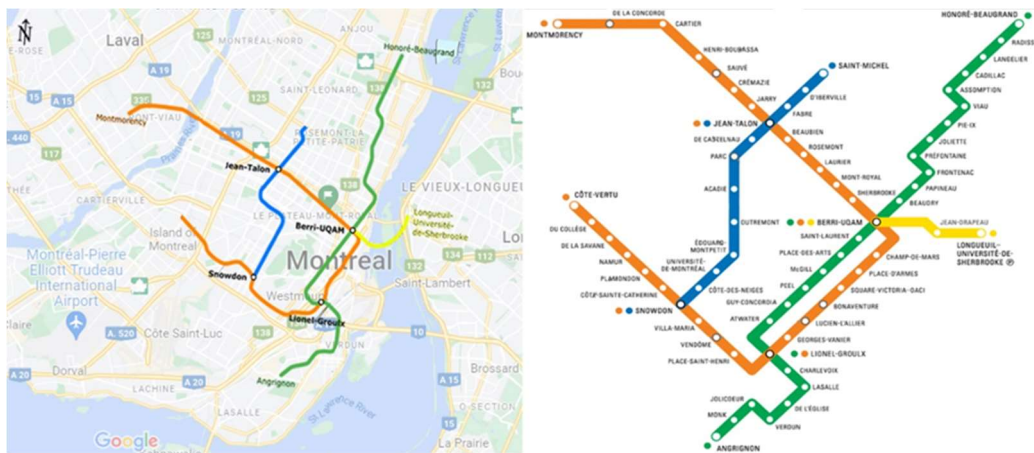


Figure 2-5. Réseau métropolitain de Montréal

#### Étape 1 : Collecte des données

Dans cette recherche, nous avons utilisé les données de l'enquête Origine-Destination de Montréal de 2018. Nous nous sommes concentrés sur les déplacements effectués exclusivement via le métro et une combinaison métro et bus, ce qui a donné un total de 813 503 déplacements (après pondération). De plus, nous avons intégré les données GTFS (Spécification Générale du Flux de Transit) des trois opérateurs mentionnés précédemment pour modéliser le réseau de transport en commun.

#### Étape 2 : Attribution de l'itinéraire

Comme indiqué précédemment, Transition a été utilisé pour l'affectation des déplacements en transport en commun et le calcul des temps de déplacement. De plus, des paramètres ont été définis, notamment le temps d'attente maximal de 20 minutes, le temps maximal d'accès et de sortie de 15 minutes et le temps d'accès maximum pendant les transferts. Par conséquent, notre méthodologie d'affectation a donné un total de 717 807 déplacements, soit plus de 88 % du nombre initial de déplacements. Les résultats révèlent que, dans notre réseau de transport en commun, la longueur moyenne des déplacements en transport en commun est de 11,6 kilomètres, accompagnée d'un temps de déplacement moyen de 43 minutes. La Figure 2-6 donne plus de détails sur ces résultats.

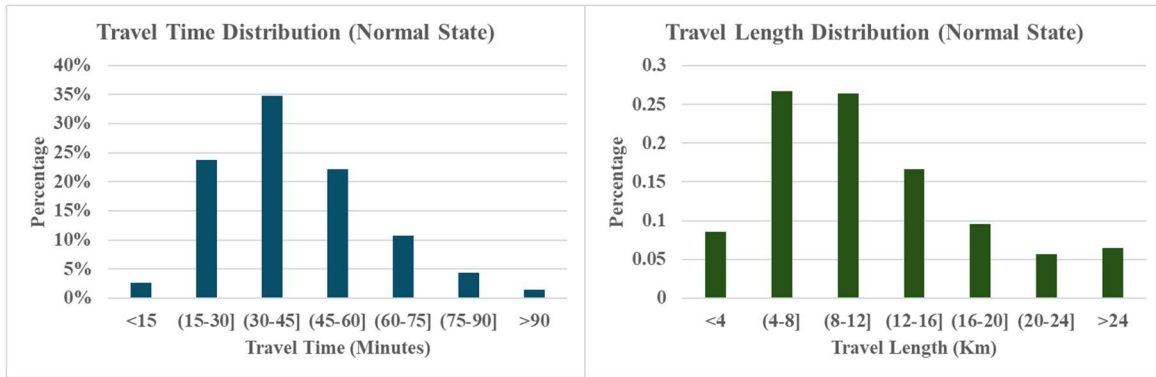


Figure 2-6. Attributs des déplacements à l'état normal

### Étape 3 : Simulation de scénarios de perturbation

Comme nous l'avons mentionné, l'application de BBFS faisait partie intégrante de la simulation des perturbations. Ce faisant, le réseau de métro de Montréal a été délimité en 24 blocs, comme l'illustre la Figure 2-7. La conception de la recherche comprenait la simulation de 12 scénarios de perturbation distincts, comprenant 3 scénarios avec une perturbation solitaire aux stations pivots (Figure 2-8 a, b et c), 3 scénarios avec deux perturbations simultanées aux stations pivots (Figure 2-8 d, e et f), 3 scénarios avec une perturbation solitaire aux stations les plus fréquemment perturbées (Figure 2-8 g, h et i), et 3 scénarios avec deux interruptions simultanées aux stations les plus fréquemment perturbées (Figure 2-8 j, k et l). Les données historiques sur les perturbations du métro dans le monde indiquent que les occurrences de plus de deux perturbations simultanées sont extrêmement rares. Par conséquent, notre recherche se limite à la simulation de deux perturbations simultanées.

Nos scénarios couvrent de manière exhaustive toutes les plages de dégradation potentielle du réseau résultant d'une ou deux perturbations, englobant des niveaux de dégradation de 3 % à 47 %. La station 18 est remarquable pour sa spécificité : parallèlement à sa désignation comme la première station pivot du réseau, cette station a également été identifiée par analyse statistique comme la station connaissant la plus grande fréquence de perturbations. Par conséquent, dans le scénario #1, nous avons simulé une seule interruption dans la station #18 et exploré trois combinaisons impliquant des perturbations simultanées dans la station #18 et d'autres stations dans les scénarios #4 à #6. Ainsi, en délimitant les scénarios de défaillance en fonction de la fréquence des perturbations, en considérant les quatre simulations de perturbations dans la station 18 dans les scénarios #1 à #6, nous désignons la station #50 (qui détenait le rang 2) comme la station connaissant la plus grande fréquence de perturbations. La Figure 2-8 a pour but de montrer plus de détails sur chaque scénario.

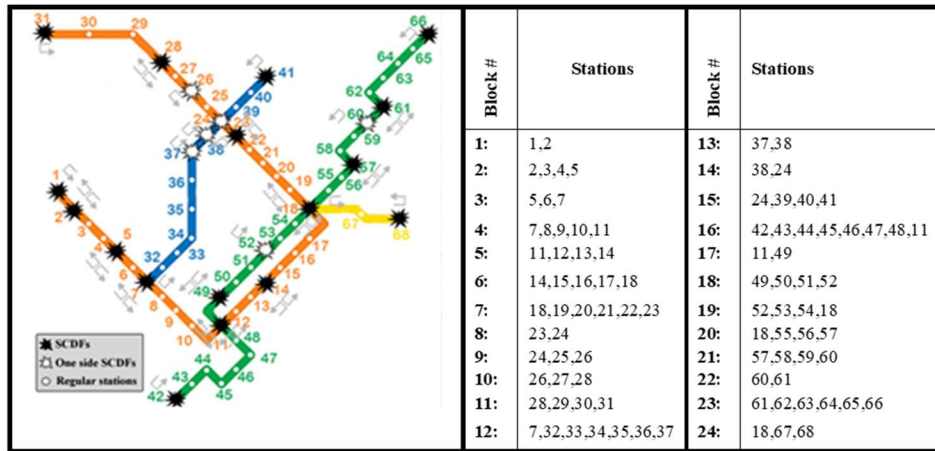


Figure 2-7. Implémentation de BBFS dans le réseau métropolitain de Montréal

Le Tableau 2-5 révèle que dans tous les scénarios, au moins 99 % des déplacements possèdent des alternatives. La valeur maximale observée pour les déplacements inférieurs aux normes (TSM) est de 0,9, ce qui correspond au scénario #5, caractérisé par une ampleur de perturbation de 40 %. De plus, une autre observation notable concerne TUSRBD, dont la valeur maximale atteint 60 %. Cela signifie que dans tous les scénarios, même lorsque seulement 3 % du réseau est perturbé, un minimum de 40 % des déplacements nécessitent des changements d'itinéraire.

Compte tenu du Tableau 2-5, une comparaison de la répartition en pourcentage du temps de déplacement dans les scénarios et en situation normale révèle que, dans presque tous les scénarios, la diminution la plus importante de la part de distribution concerne les déplacements d'une durée de 30 à 45 minutes. Cette catégorie connaît une réduction d'environ 40 % lorsque le réseau subit des perturbations majeures. À l'inverse, dans tous les scénarios, l'augmentation relative la plus notable de la proportion de déplacements est observée dans les déplacements les plus longs, d'une durée de plus de 90 minutes. Alors qu'elle ne représentait que 1 % en situation normale, dans certains scénarios, cette catégorie a connu une augmentation de 10 % ou plus. De plus, comme prévu, dans tous les scénarios, il y a une réduction du pourcentage de fréquence des déplacements de moyenne durée (ceux qui durent moins de 45 minutes) par rapport à la situation normale. Dans le même temps, il y a une augmentation correspondante du pourcentage de longs déplacements, ce qui entraîne un allongement global de la durée des déplacements. Cela devient évident lorsque l'on considère l'ampleur des perturbations, le temps de déplacement moyen (ATT) et le surplus de temps de déplacement ( $\tau_A$ ) ensemble. L'excédent de temps de déplacement indique le pourcentage d'augmentation du temps de déplacement par rapport à la situation normale. L'augmentation de l'ampleur de la perturbation dans chaque scénario entraîne une augmentation de l'ATT et de  $\tau_A$ .





CSS: Code de la station sélectionnée  
IRSS: Rang d'importance de la station sélectionnée

Figure 2-8. Simulation de scénarios de défaillance

Tableau 2-5. Comparaison des attributs dans les scénarios d'interruptions

Numéro du scénario	Nom du scénario	Type de perturbation	Critère de sélection	l'ampleur des perturbations (%)	ATT (min)	USRBD	SST	Répartition du temps de déplacement (min)							
								<15	(15-30]	(30-45]	(45-60]	(60-75]	(75-90]	>90	
<b>État normal</b>									3%	24%	35	22%	11%	4%	1%
1	U-I-25	Unique	IG*	25%	54	25%	26%	0.20%	1%	12%	26%	26%	17%	10%	7%
2	U-I-21	Unique	IG	21%	48	12%	48%	0.10%	2%	18%	30%	24%	15%	7%	4%
3	U-I-19	Unique	IG	19%	48	12%	49%	0.10%	2%	17%	31%	25%	14%	7%	4%
4	D-I-47 (1)	Double	IG	47%	58	35%	15%	0.30%	1%	10%	22%	25%	19%	12%	11%
5	D-I-47 (2)	Double	IG	47%	58	34%	18%	0.30%	1%	10%	23%	26%	18%	12%	10%
6	D-I-40	Double	IG	40%	60	39%	11%	0.90%	1%	9%	20%	25%	19%	13%	12%
7	U-F-3 (1)	Unique	FP**	3%	45	4%	59%	0.20%	2%	20%	35%	24%	12%	5%	2%
8	U-F-3 (2)	Unique	FP	3%	47	8%	56%	0.30%	2%	19%	32%	25%	13%	6%	3%
9	U-F-4	Unique	FP	4%	46	7%	58%	0.30%	2%	20%	33%	23%	13%	6%	2%
10	D-F-6	Double	FP	6%	47	10%	49%	0.30%	2%	18%	32%	25%	14%	6%	3%
11	D-F-7	Double	FP	7%	47	9%	49%	0.30%	2%	18%	33%	24%	13%	6%	3%
12	D-F-24	Double	FP	24%	49	14%	44%	0.20%	2%	16%	30%	25%	15%	8%	4%

\* IG: Importance des Gares

\*\* FP: Fréquence des perturbations

#### Étape 4 :

Comme nous l'avons expliqué dans la section précédente, dans tous les scénarios, une partie notable des déplacements vont changer de trajet en raison de l'interruption. Par conséquent, nous utilisons le seuil défini dans chaque scénario pour déterminer la demande satisfaite selon chaque niveau de qualité. Le Tableau 2-6 montre que dans le premier scénario, caractérisé par la perturbation de la station pivot du réseau, seulement 26 % des déplacements peuvent respecter leur itinéraire normal, et pour 14 % des déplacements, le temps de déplacement subit une augmentation de 10 % ou moins, ce qui donne une valeur de  $SD_1^1(\%)$  égale à 40 %. De même, l'analyse révèle que le temps de déplacement augmente de 10 % à 25 % pour 16 % des déplacements, ce qui conduit à  $SD_2^1(\%)$  une valeur correspondante de 56 %. De même,  $SD_3^1(\%) = 78\%$ ,  $SD_4^1(\%) = 91\%$ , and  $SD_5^1(\%) = 99.8$ , et 0,2 % des déplacements dans ce scénario ne peuvent plus être effectués par le réseau de transport en commun.

Le Tableau 2-6 montre également qu'il existe une tendance générale discernable selon laquelle l'augmentation de l'ampleur de la perturbation dans divers scénarios est corrélée à une réduction du pourcentage de déplacements utilisant le même itinéraire qu'avant la perturbation (TUSRBD). Le scénario #7, caractérisé par une ampleur minimale de perturbation (3 %), présente les valeurs les plus élevées pour le TSRBD et  $SD_1(\%)$  parmi tous les scénarios. Dans ce scénario, 59 % des déplacements ne changent pas de trajet et le temps de déplacement de 87 % des déplacements connaît une augmentation de 10 % ou moins. Cependant, contrairement à nos attentes initiales, les scénarios #4 et #5, caractérisés par la plus grande ampleur de perturbation, à 47 %, ne donnent pas les parts minimales pour ces indicateurs. Plutôt, le scénario #6, avec une ampleur de perturbation de 40 %, apparaît comme le scénario associé aux valeurs minimales pour TSRBD et  $SD_1(\%)$ .

Tableau 2-6. Demande satisfaite et surplus de temps de trajet dans les différents scénarios

Numéro du scénario	Nom du scénario	K=1 (USRBD)	K≤1.1		K≤1.25		K≤1.5		K≤1.75		K>1.75	
			$SD_{1.1}$	$\tau_{1.1}$	$SD_{1.25}$	$\tau_{1.25}$	$SD_{1.5}$	$\tau_{1.5}$	$SD_{1.75}$	$\tau_{1.75}$	$SD_{all}$	$\tau_{all}$
1	U-I-25	26%	40%	9%	56%	16%	78%	24%	91%	26%	100%	28%
2	U-I-21	48%	68%	5%	81%	8%	91%	12%	96%	14%	100%	15%
3	U-I-19	49%	69%	5%	80%	9%	91%	12%	96%	14%	100%	14%
4	D-I-47 (1)	15%	26%	11%	42%	19%	68%	29%	85%	35%	100%	37%
5	D-I-47 (2)	18%	28%	9%	43%	18%	69%	29%	87%	34%	100%	36%
6	D-I-40	11%	20%	8%	34%	19%	62%	34%	83%	40%	99%	41%
7	U-F-3 (1)	59%	84%	6%	95%	7%	98%	6%	99%	6%	100%	6%
8	U-F-3 (2)	56%	78%	4%	87%	6%	94%	9%	97%	10%	100%	10%
9	U-F-4	58%	80%	3%	90%	6%	96%	8%	99%	9%	100%	9%
10	D-F-6	49%	71%	6%	84%	9%	93%	11%	97%	12%	100%	12%
11	D-F-7	49%	72%	6%	85%	8%	95%	10%	98%	11%	100%	11%
12	D-F-24	44%	62%	5%	75%	10%	88%	15%	95%	16%	100%	16%

On observe une corrélation notable entre l'augmentation de l'ampleur des perturbations et l'augmentation correspondante de l'excédent de temps de déplacement ( $\tau$ ). Cette corrélation devient plus prononcée lorsque le critère de qualité (K) augmente. Dans presque tous les scénarios, on observe que l'application de seuils de qualité inférieure entraîne une augmentation du surplus de temps de trajet.

#### Étape 5 :

Dans la présente analyse, l'utilisation d'un modèle de régression est envisagée. En examinant les nuages de points, il devient évident qu'il existe une relation linéaire entre les variables

dépendantes et indépendantes dans les deux contextes : 1) dans la « prédiction de la demande satisfaite à différents niveaux de qualité », où l'ampleur de la perturbation sert de variable indépendante, et la demande satisfaite de variable dépendante et 2) dans la « prédiction du surplus de temps de déplacement à divers niveaux de qualité », avec l'ampleur de la perturbation comme variable indépendante et le surplus de temps de déplacement comme variable dépendante. Par conséquent, nous utilisons un modèle de régression linéaire, articulé comme suit, pour explorer systématiquement la corrélation entre ces variables.

$$Y = c + \beta X$$

Où Y est la variable indépendante, c'est une constante et  $\beta$  est le coefficient de régression.

Après ajustement des modèles, la pertinence du modèle de régression pour les ensembles de données a été évaluée par divers indicateurs. Un diagramme Q-Q (quantiles théoriques vs quantiles d'échantillon) et le test de Shapiro-Wilk ont été utilisés pour vérifier la distribution normale des résidus, avec P-values associée (voir Tableau 2-7). L'examen des nuages de points résiduels a permis d'assurer l'homoscédasticité. Ces résultats indiquent collectivement que le modèle de régression répond aux hypothèses nécessaires et est bien adapté à l'ensemble de données analysé. De plus, pour la plupart des modèles, les valeurs du R au carré fluctuent autour de 0,87, ce qui suggère une précision intéressante des modèles.

Tableau 2-7. Résultats de la régression linéaire

Niveau de qualité	Prédiction de la demande satisfaite				Prédiction du surplus de temps de déplacement			
	Shapiro-Wilk p-value	Intercept	Coefficient	R-squared	Shapiro-Wilk p-value	Intercept	Coefficient	R-squared
K=1	0.4705	0.60	-0.98	0.8742	-	-	-	-
K≤1.1	0.4959	0.85	-1.31	0.8879	0.0662	0.04	0.10	0.57474
K≤1.25	0.7490	0.95	-1.19	0.8844	0.9987	0.05	0.28	0.85873
K≤1.5	0.7172	1.00	-0.70	0.8743	0.9153	0.06	0.53	0.87066
K≤1.75	0.4283	1.00	-0.32	0.8637	0.6442	0.06	0.65	0.87976
K>1.75	-	-	-	-	0.7874	0.05	0.70	0.89325

Lorsque  $K > 1,75$ , la demande satisfaite dans presque tous les scénarios s'élève systématiquement à 100 %. Cette condition entraîne des résidus non normalement distribués, contrairement aux hypothèses inhérentes au modèle de régression linéaire. Par conséquent, la dernière ligne du Tableau 2-7 du modèle relatif à la prédiction de la demande satisfaite dans divers niveaux de qualité n'est pas spécifiée. De plus, étant donné qu'il n'y a pas de surplus de temps de déplacement pour TUSRBD, où  $K = 1$ , il est exclu de la prise en compte dans le modèle lié à la prédiction du surplus de temps de déplacement. Par conséquent, la première ligne du tableau n'a pas de valeurs spécifiées.

Dans la prédiction de la demande satisfaite à différents niveaux de qualité, on observe que les valeurs du  $R^2$  oscillent autour de 0,87 dans tous les scénarios, ce qui suggère une précision acceptable de nos modèles. De plus, les coefficients négatifs de tous les modèles suggèrent qu'une augmentation de l'ampleur des perturbations entraîne une diminution de la demande satisfaite. Lorsque l'on examine les valeurs absolues des coefficients, il devient évident que le coefficient le plus élevé correspond à  $K \leq 1.1$ . Cela implique qu'à ce niveau de qualité spécifique, la demande satisfaite est plus sensible à l'ampleur de la perturbation par rapport aux autres niveaux de qualité. En termes plus simples, une escalade de l'ampleur de la perturbation entraîne une réduction plus importante de la demande satisfaite à ce niveau de qualité particulier qu'à d'autres, une tendance confirmée par les pentes des diagrammes de la Figure 2-9. Ce résultat n'est pas surprenant.



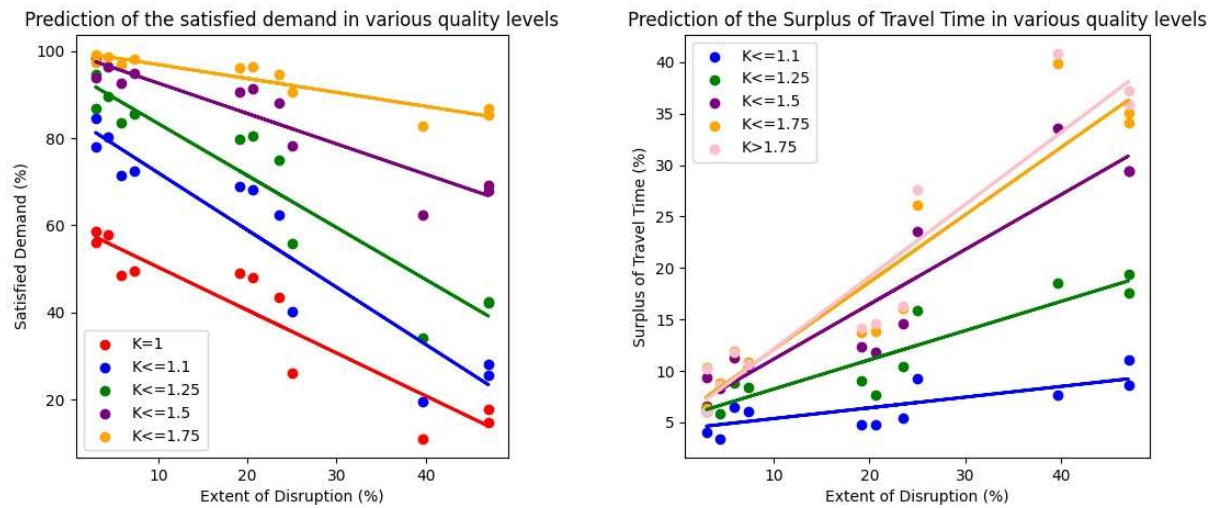


Figure 2-9. Diagrammes de régression linéaire

Dans le contexte de la prédiction du temps de déplacement excédentaire à différents niveaux de qualité, lors de l'analyse des données initiales, le tracé Q-Q du premier modèle ( $K \leq 1.1$ ) a révélé un écart plus important par rapport à la ligne droite par rapport aux autres modèles. De plus, bien qu'une P-value  $> 0,05$  dans le test de Shapiro-Wilk appuie généralement l'application de modèles de régression linéaire, la différence significative entre la valeur P de ce modèle particulier et des autres modèles montre que les résidus de ce modèle ne sont pas aussi normalement distribués que dans les autres modèles. Par conséquent, ce modèle présente une valeur  $R^2$  relativement plus faible ( $R^2 \leq 0,57$ ) par rapport aux autres modèles. Néanmoins, il convient de noter que les autres modèles présentent des valeurs  $R^2$  acceptables, ce qui suggère une précision intéressante de ces modèles. En général, comme le montre la Figure 2-9, il existe une relation selon laquelle une augmentation de l'ampleur de la perturbation est corrélée à une augmentation du surplus de temps de déplacement, et cet effet devient plus prononcé dans les modèles avec des valeurs plus élevées de K, tel qu'attendu.

#### 2.1.2.5 Conclusion

Les résultats de cette étude soulignent une corrélation linéaire entre l'ampleur de la perturbation et le niveau de demande satisfaite, avec une diminution anticipée de demande satisfaite à mesure que l'ampleur de la perturbation augmente, particulièrement évidente à des niveaux de qualité plus élevés. Une autre observation est que dans presque tous les scénarios où aucun seuil de qualité n'est appliqué, la demande satisfaite atteint 100 %. Cela suggère que même face à des perturbations importantes dans le système de métro, tous les déplacements en transport en commun pourraient toujours être pris en charge, bien qu'au détriment de temps de déplacement plus longs. De plus, notre analyse révèle la prévisibilité du surplus de temps de déplacement en tenant compte de l'ampleur des perturbations, en particulier à des niveaux de qualité inférieurs, où les perturbations exercent un effet plus prononcé.

La méthode la plus populaire pour connecter les sections perturbées du réseau consiste à déployer un service de bus de substitution (Zhang, Lo et al. 2021). Cependant, en raison du coût élevé de l'achat et de l'entretien des autobus, de la difficulté d'installer des dépôts dans différentes parties de la ville, ainsi que des dépenses des chauffeurs de réserve, les opérateurs préfèrent généralement mobiliser des autobus d'autres lignes pour servir de navettes plutôt que d'établir un service réservé dédié. Ce phénomène entraînera inévitablement une réduction de



l'offre, une augmentation du temps de déplacement et une diminution de la qualité des déplacements dans d'autres zones du réseau, notamment aux heures de pointe. Par conséquent, la réalisation de telles recherches comble non seulement une lacune importante en évaluant l'influence des perturbations à court terme du métro sur la qualité des déplacements des usagers, mais fournit également aux opérateurs des informations précieuses sur la nécessité de mettre en œuvre des services de substitution des bus pour toutes les perturbations à moyen terme.

Comme limite de la recherche, il est important de noter que nous avons utilisé des données Origine-Destination (OD) exclusivement relatives aux jours de semaine. Il aurait été utile d'étendre cette analyse aux fins de semaine également, ce qui aurait permis de comparer les résultats sur différentes périodes. De plus, dans l'itinéraire des déplacements, nous avons supposé que tous les passagers rechercheraient et choisiraient activement les itinéraires alternatifs disponibles les plus rapides après une perturbation. Cependant, il convient de reconnaître qu'en réalité, certains passagers peuvent choisir de rester dans le système de métro et d'attendre la fin de la perturbation, ce qui pourrait avoir un impact sur la dynamique du comportement de déplacement et le choix de l'itinéraire. Dans cette étude, nous n'avons pas pris en compte la capacité des bus, en supposant plutôt qu'il y aurait suffisamment de places pour tous les passagers optant pour le système de bus lors des perturbations du métro. Il s'agit certainement d'une limitation.

Dans la phase suivante de cette étude, nous proposons d'élargir notre analyse pour inclure les services ferroviaires régionaux, les modes partagés tels que l'autopartage et le vélopartage, ainsi que les modes de transport actifs. Ce champ d'application plus large vise à évaluer l'efficacité des options multimodales pour atténuer l'impact des perturbations dans les systèmes de métro. Par ailleurs, en tenant compte de la capacité des bus, nous visons à calculer le nombre de bus supplémentaires nécessaires pour le système de transport en commun. De plus, nous avons l'intention d'étudier le déploiement de services de substitution par bus, avec et sans services réservés, pour les segments perturbés. Grâce à une analyse comparative, nous visons à évaluer le rendement du système de transport en commun dans des scénarios où des substituts d'autobus sont utilisés par rapport à des scénarios où les options multimodales sont pleinement opérationnelles. Cette approche globale fournira des informations précieuses sur l'efficacité comparative de diverses stratégies d'atténuation des perturbations dans les systèmes de transport urbain.

### 2.1.3 Comparaison des modèles de temps et de vitesses de bus à différents niveaux d'analyse pour la planification des transports en commun

Par : Yuxuan Wang, doctorat

Supervision : Pre Catherine Morency et Pr Martin Trépanier

Contexte : CRSNG subventions à la découverte

Fin prévue : décembre 2024

#### 2.1.3.1 Introduction

Les bonnes estimations du temps de parcours en transport en commun sont importantes pour les opérations des sociétés de transport et la satisfaction des usagers. Pour une société de transport, les estimations affectent la planification et les coûts d'exploitation. Pour les passagers, des temps de parcours peuvent les amener à arriver en retard. Ces temps de parcours peu fiables affectent également la satisfaction des passagers et le choix du mode de transport (Carrel, et al., 2013). Il est donc important d'améliorer les modèles de temps de trajet en transport en commun.

Jusqu'à présent, les sociétés de transport et les chercheurs se sont principalement concentrés sur la prévision des temps de parcours (Trépanier, et al., 2009). Les horaires de transport sont communiqués aux opérateurs et aux passagers par les heures d'arrivée et de départ, qui sont directement liées aux temps de parcours. Les planificateurs de transport en commun pourraient diagnostiquer les problèmes d'un segment donné en utilisant les observations directes et ajuster les temps en conséquence.

Le temps de parcours est fonction de la vitesse et de la distance, et la distance ne change pas pour le réseau bus (exclusion des détours liés aux chantiers par exemple). Donc, nous pouvons utiliser les deux mesures, le temps et la vitesse pour la planification des horaires. La vitesse permet également des comparaisons entre différents segments du réseau, parce que les distances entre les arrêts ne sont pas nécessairement les mêmes pour tous les segments. Un bus local peut s'arrêter tous les 300 mètres et un bus express peut parcourir un segment sans arrêt de 15 kilomètres en 20 minutes. Il peut également être plus intuitif pour les chauffeurs de s'ajuster à une vitesse de parcours et d'évaluer les comportements requis pour être à l'heure.

Dans le but d'améliorer les modèles de temps de parcours en transport en commun et la satisfaction des passagers, nous visons à aider les planificateurs à mieux comprendre les conditions de déplacement en transport en commun. Nous développons un cadre qui permet de calculer et de comparer deux mesures pour la planification des transports en commun. Ensuite, nous modélisons les temps et les vitesses à différents niveaux d'analyse en utilisant deux années de données archivées de Montréal. Enfin, nous comparons les avantages et les désavantages de ces deux approches ainsi que les différents niveaux d'analyse, afin de pouvoir formuler des recommandations utiles pour soutenir les agences de transport dans leur planification et leurs opérations.

#### 2.1.3.2 Revue de littérature

La performance du transport en commun est importante pour les sociétés de transport dans leur planification et leurs opérations. Les chercheurs ont également étudié les mesures existantes et proposé des mesures supplémentaires de performance des transports en commun. Deux mesures couramment utilisées pour la planification sont le temps de parcours et la vitesse d'opération, qui peuvent être facilement obtenues à l'aide des systèmes de localisation automatisée des véhicules.

Le temps de parcours est une mesure importante pour la planification des horaires. Les sociétés de transport évaluent les performances et ajustent régulièrement les heures de départ et les intervalles de service selon les moyennes ou les percentiles prédéterminés (Furth, 2000).

Pour aider à fournir des informations aux usagers, de nombreux chercheurs ont tenté de prédire les temps de parcours en transport en commun. Certains travaux utilisaient uniquement des données GPS (Chen, et al., 2022). Il existe également des tentatives pour ajouter des données supplémentaires pour améliorer les modèles de prédiction, tels que les données de circulation en temps réel (Ma, et al., 2019).

La vitesse d'opération est un autre indicateur couramment utilisé pour les évaluations de la performance des transports en commun.

Cortés et al. (2011) ont créé une classification des vitesses et identifié des segments de parcours plus lents pour que les sociétés puissent améliorer la vitesse de leurs trajets. Aemmer et al. (2022) ont agrégé le temps de parcours par segments de parcours pour calculer l'allure (inverse de la vitesse). Les résultats montrent que les bus peuvent plus souvent voyager plus vite que prévu sur quelques segments sélectionnés. Zhang et al. (2014) ont testé quelques facteurs affectant la vitesse de fonctionnement des bus, tels que les voies réservées, la classification des rues, la zone géographique et les types de services.

Étant donné la relation entre le temps et la vitesse, il est nécessaire de comparer les deux mesures, le temps et la vitesse, pour examiner leurs avantages et leurs désavantages dans différents scénarios de planification. Même si la majorité de la planification est effectuée entre deux points de contrôle, les usagers ont besoin d'heures d'arrivée et de départ à leur arrêt. Cela nécessite des recherches plus approfondies sur les pratiques de planification au niveau des arrêts. De plus, les travaux mentionnés ici ont utilisé plusieurs mesures d'erreur pour évaluer les performances de leurs modèles, telles que des mesures absolues et des mesures relatives. Pourtant, ces mesures sont généralement regroupées en un seul chiffre. Il faut aussi comparer les erreurs par segment pour découvrir des biais potentiels.

### *2.1.3.3 Cadre de recherche*

Le cadre de recherche est résumé dans la Figure 2-10. Nous utilisons les données GTFS et GTFS en temps réel fournies par la Société de Transport de Montréal de mai 2021 à mars 2024 pour calculer les temps moyens et les vitesses moyennes. Ensuite, nous ajoutons des caractéristiques spatiales supplémentaires à l'aide d'OpenStreetMap et des données ouvertes fournies par la ville de Montréal pour analyser les temps et les vitesses.

Puis, nous testerons les modèles dans deux scénarios de planification, nouvelles routes et nouvelles heures. Dans le premier cas, nouvelles routes, les sociétés n'ont pas de données historiques. Donc, nous réservons 10% des segments de notre ensemble de données pour tester les modèles. Pour les nouvelles heures de service, les sociétés n'ont pas de données historiques pour certaines heures données sur un segment existant. Nous réservons aussi 10% des données restantes pour les tests.

Enfin, nous comparons et évaluons les résultats des modèles à l'aide de quelques mesures d'erreur couramment utilisées. Nous discutons également de leurs implications en matière de planification dans la section des résultats.

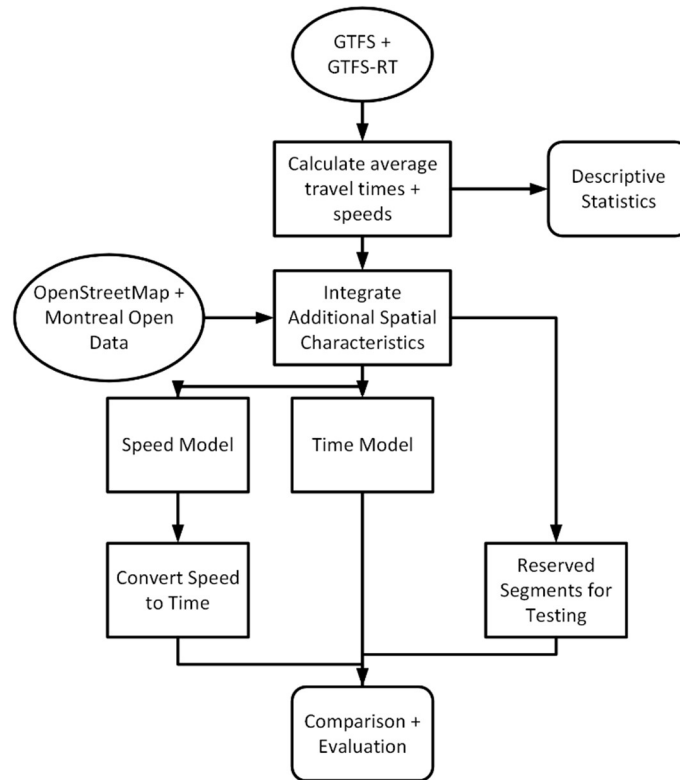


Figure 2-10. Cadre de recherche

#### 2.1.3.4 Méthodologie

Notre recherche porte sur des mesures répétées sur un sujet, dans notre cas un segment le long d'une ligne de bus, les données sur chaque segment pouvant être corrélées. Donc, nous devons adopter un modèle mixte pour tenir compte de ces différences inobservées entre chaque segment (Yang, et al., 2014).

Nous testons deux modèles mixtes, un modèle linéaire et un modèle non-linéaire. Le modèle linéaire mixte est similaire au modèle de régression linéaire classique, mais avec un terme supplémentaire pour tenir compte des effets aléatoires ou des facteurs de regroupement (Laird et Ware, 1982). Pour prédire un nouveau segment ne faisant partie d'aucun groupe observé, le modèle utilise les coefficients du niveau de population sans effet aléatoire du groupe.

La méthode non linéaire utilisée est la méthode des forêts aléatoires avec une extension pour tenir compte des effets aléatoires (Hajjem, et al., 2014). L'idée est de générer plusieurs arbres de régression en utilisant une partie des données dans l'ensemble du réseau et une partie de données d'un segment spécifique. Pour prédire un nouveau point de données ne faisant pas partie des groupes existants, l'algorithme suit les règles de répartition estimées en fonction des variations du niveau de population sans effet aléatoire.

#### 2.1.3.5 Modélisation

##### Coefficients des modèles

Le Tableau 2-8 montre les effets aléatoires pour les modèles linéaires mixtes. Pour réitérer, l'effet aléatoire montre les différences individuelles non observées pour chaque segment, telles que les différents niveaux de congestion et les synchronisations des feux de circulation. Pour chaque

segment, l'effet aléatoire d'un segment montre les changements supplémentaires (Yang, et al., 2014).

Dans ce tableau, nous montrons l'écart-type pour les effets aléatoires à chaque niveau d'analyse. Les modèles de vitesse ont des effets aléatoires similaires, autour de 5 km/h. Pour le modèle de temps, nous pouvons observer que quand le niveau d'analyse augmente, les différences individuelles augmentent. Ce résultat est comme prévu, parce que les niveaux d'analyse les plus agrégés ont tendance à être plus longs et les variations des temps vont être plus importantes.

Nous avons également inclus la corrélation intra-classe (ICC) ajustée, qui explique la proportion de la variance totale qui peut être expliquée en regroupant tout simplement les segments (Hox, et al., 2017). Nous pouvons observer que tous les modèles ont un ICC supérieur à 0,6, ce qui indique qu'il existe des différences entre les segments individuels et il montre l'importance d'utiliser le modèle mixte pour tenir compte des différences entre les segments. Cela souligne également l'importance d'améliorer nos modèles avec des données plus détaillées qui ne sont pas observées dans notre étude, telles que les variations de congestion, les horaires des feux de circulation et les variations d'achalandage. Les échelles d'analyse plus courtes ont tendance à avoir un ICC plus grand. Donc, les analyses sur de plus longs segments peuvent masquer des variations détaillées avec de petits segments. Nous soulignons que les recherches supplémentaires sont nécessaires pour planifier les horaires à chaque arrêt, élément également souligné par d'autres chercheurs (Wessel, et al., 2017).

Tableau 2-8. Effets aléatoires pour les modèles linéaires mixtes

	Speed	ICC	Adj. ICC	Time	ICC	Adj. ICC
Inter-stop	5,17	0,47	0,74	19,18	0,17	0,87
Stop to stop	5,67	0,40	0,69	21,39	0,18	0,79
Timepoint to Timepoint	3,99	0,30	0,63	56,82	0,12	0,62
Service Pattern	4,34	0,38	0,92	315,90	0,14	0,62

Le Tableau 2-9 montre tous les coefficients à effets fixes estimés à partir du modèle linéaire. Pour interpréter les coefficients, les vitesses sont en km/h et les temps sont en secondes. De plus, nous avons marqué les variables avec une valeur p inférieure à 0,05 en italique, car la plupart des coefficients sont statistiquement significatifs.

Généralement, la plupart des coefficients et des signes correspondent à nos attentes. Nous pouvons observer des signes opposés entre les modèles de vitesse et de temps. Étant donné une distance fixe, si la vitesse est plus élevée, le temps est plus court. Les modèles de temps montrent que plusieurs variables spatiales, telles que l'utilisation du sol, ne sont pas significatives. En plus, les coefficients de distances dans les modèles de temps sont fixés et peuvent être interprétés comme le temps pour parcourir un kilomètre. Ceci peut être trop restrictif parce que les vitesses et les congestions changent pour chaque rue, et cela peut devenir problématique si nous essayons de planifier un nouveau service. Donc, nous devons tester leurs performances de plus près dans les prochaines sections.

Tableau 2-9. Effets fixes pour les modèles linéaires mixtes

	Speed				Time			
	Inter-stop	Stop	Timepoint	Service	Inter-stop	Stop	Timepoint	Service
Intercept	31,38	27,38	14,07	<u>0,63</u>	-13,37	-10,77	58,33	1213,00
Number of Stops	NA	NA	-0,17	-0,12	NA	NA	2,13	9,93
Period Sep	-0,13	-0,28	0,34	<u>-0,03</u>	0,39	0,78	-2,03	29,67
Period Nov	-0,34	-0,18	0,19	<u>0,02</u>	0,37	0,26	-2,61	25,81
Period Jan	-0,89	-0,26	0,26	<u>0,04</u>	1,11	0,39	-2,12	18,70
Period Mar	-0,82	-0,11	0,23	<u>0,07</u>	0,73	0,45	-1,08	23,71
Weekday Early AM	2,80	4,72	4,40	4,83	-5,62	-13,21	-71,58	-536,20
Weekday AM Peak	0,56	0,72	0,93	0,69	-1,64	-3,12	-19,25	-98,43
Weekday Midday	0,87	1,45	1,47	1,51	-2,58	-5,01	-27,61	-216,90
Weekday Night	1,81	3,46	3,53	3,29	-4,28	-10,34	-60,45	-385,90
Weekday Late night	5,61	8,54	6,01	2,62	-7,27	-17,79	-86,79	51,82
Saturday Early AM	3,94	6,46	6,05	5,89	-6,06	-14,85	-89,62	-615,40
Saturday AM	2,69	3,87	3,79	4,12	-5,06	-10,72	-64,67	-507,70
Saturday PM	1,25	2,20	1,95	1,88	-2,55	-5,84	-34,33	-267,50
Saturday Night	2,04	3,88	3,75	3,61	-4,12	-10,30	-62,49	-448,40
Saturday Late Night	4,78	7,69	5,99	5,39	-6,31	-15,94	-82,72	-588,60
Sunday Early AM	4,34	7,00	6,36	6,25	-6,45	-15,90	-92,27	-635,80
Sunday AM	3,25	4,66	4,50	4,74	-5,68	-12,07	-72,36	-553,90
Sunday PM	1,69	2,64	2,43	2,45	-3,32	-7,11	-42,86	-337,80
Sunday Night	2,41	4,30	4,24	4,06	-4,68	-11,32	-69,74	-499,10
Sunday Late Night	5,89	8,25	6,27	4,29	-6,30	-16,24	-92,67	-318,00
Bus Lane In Service	-0,57	-0,55	-0,82	<u>-0,63</u>	4,88	6,20	21,83	<u>74,30</u>
Bus Lane Out Service	-0,43	-0,78	-1,04	<u>-0,84</u>	4,25	5,16	17,12	<u>126,10</u>
Average Delay	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
Average Load	-0,10	-0,23	-0,07	-0,11	0,08	0,50	1,01	17,95
Average Frequency	-0,10	-0,10	0,00	0,03	-0,03	0,09	0,42	7,78
Number Turns	-3,39	-2,68	-0,41	<u>-0,07</u>	12,61	13,62	9,67	33,09
Number Lanes	0,81	0,35	-0,50	-2,57	-2,83	-2,32	-7,03	<u>64,96</u>
Number Stop Signs	-1,70	-0,98	-0,43	-0,13	5,42	4,71	8,09	11,89
Number Traffic Lights	-1,78	-2,50	-0,57	-0,07	9,15	12,84	14,61	19,44
Speed Limit	0,06	0,05	0,13	0,52	<u>-0,03</u>	<u>-0,03</u>	<u>0,29</u>	-32,98
Local Length	4,52	6,91	3,59	1,52	90,79	81,15	84,06	<u>20,76</u>
Collector Length	6,41	8,83	2,82	0,82	95,35	91,14	87,65	32,97
Secondary Length	7,95	10,58	3,65	0,75	94,27	88,21	79,68	64,86
Primary Length	5,58	8,55	3,68	0,59	106,50	99,48	73,00	58,32
Motorway Length	4,22	4,29	2,59	1,02	47,29	46,43	49,23	78,14
Green Space	0,93	1,40	0,29	<u>-0,13</u>	<u>1,13</u>	<u>0,32</u>	<u>1,66</u>	<u>-0,04</u>
Downtown	-1,28	-0,20	0,08	-1,51	<u>0,60</u>	<u>0,13</u>	<u>4,72</u>	<u>24,54</u>
Retail	-1,33	-1,92	-1,53	1,39	3,20	6,81	23,11	<u>38,63</u>
Industry	2,80	3,44	0,52	<u>-0,74</u>	1,75	<u>-0,17</u>	<u>-3,25</u>	<u>39,22</u>
Population Density	-0,11	-0,23	-0,28	-0,25	<u>-0,18</u>	<u>0,15</u>	2,55	<u>2,02</u>
Distance to Downtown	0,22	0,26	0,27	<u>0,10</u>	<u>-0,04</u>	<u>-0,15</u>	-1,95	<u>0,42</u>

### Comparaisons de modèles

Le Tableau 2-10 montre les résultats des mesures d'erreur agrégées couramment utilisées dans la littérature. Les modèles les plus performants dans chaque catégorie sont indiqués en caractères gras.

Nous pouvons observer que la méthode des forêts aléatoires est plus performante que la méthode linéaire. Les valeurs  $R^2$  sont généralement plus élevées et les mesures RMSE et MAPE sont plus faibles. Les différences de MAPE se situent généralement à trois pour cent. Les différences de RMSE entre les deux méthodes sont généralement à deux ou trois secondes pour les segments courts, mais plus grandes pour les objets plus longs. Donc, un faible pourcentage d'erreur peut correspondre à une erreur absolue plus grande. Généralement, les différences entre les deux méthodes de modélisation ne sont pas trop grandes.

Les modèles de temps fonctionnent mieux pour les nouvelles heures de service, mais les modèles de vitesse fonctionnent mieux pour les nouvelles routes. Dans nos modèles, nous avons inclus les variables liées à la vitesse, telles que les configurations de rue et l'utilisation du sol, ainsi que des variables liées au temps, telles que les feux de circulation. Les ordonnées à l'origine aléatoires incluses dans les modèles pourraient aider à atténuer certaines limitations de données. Nous pensons que les modèles de vitesse pourraient être plus intuitifs pour les scénarios de nouvelle route parce qu'aucune information temporelle n'est observée, comme les synchronisations des feux. Pour améliorer ces modèles, les travaux futurs pourraient ajouter ces informations manquantes en créant un modèle hybride et en combinant les modèles de temps et de vitesse.

Une autre observation intéressante est que les différentes mesures peuvent indiquer des « gagnants » différents dans la même catégorie. Donc, cela indique certains biais potentiels que différentes mesures d'erreur pourraient compenser. Par exemple, la mesure MAPE tend à prévoir des valeurs inférieures (Goodwin et Lawton, 1999), ce qui est encore une fois lié à la question initiale de cette recherche. En raison des différences de longueur, nous pouvons préférer des erreurs plus petites sur les segments courts et tolérer des erreurs plus importantes sur les segments longs. Ainsi différentes mesures d'erreur évaluent les résultats « sous différents angles » (Kolassa, 2020).

Nous fournirons ensuite une analyse désagrégée des erreurs. Dans cette section, nous utilisons les modèles mixtes linéaires entre deux points de contrôle pour les scénarios de nouvelle route comme exemple. La Figure 2-11 montre les distributions d'erreurs pour les résultats directs et les résultats indirects du modèle de vitesse. Pour mieux visualiser les différences, nous avons utilisé la même échelle x et y pour les deux graphiques.

Les distributions des erreurs du modèle de temps sont plus proches de la distribution normale, parce que le modèle direct tente de donner des estimations impartiales. Cependant, les erreurs pour les résultats indirects sont plus centrées autour de 0, mais asymétriques vers la droite. Donc, les modèles de vitesse ont tendance à sous-estimer les temps de trajet moyens. De plus, les vitesses sont des valeurs limitées entre 0 et 90 km/h, et les valeurs de temps n'ont pas de limite supérieure. Donc, les congestions peuvent avoir plus d'impact sur les temps moyen que les vitesses moyennes.

Tableau 2-10. Mesures d'erreurs pour les modèles

		New Hours		New Route		New Hours		New Route	
		Linear	Forest	Linear	Forest	Linear	Forest	Linear	Forest
		Inter-stop				Timepoint			
Speed	R2	0,83	0,87	0,39	0,52	0,82	0,86	0,52	0,59
	RMSE	3,04	2,67	5,77	5,14	2,99	2,68	5,01	0,46
	MAE	2,17	1,86	4,49	3,85	1,92	1,66	3,67	3,32
	MAPE	0,08	0,07	0,17	0,15	0,11	0,09	0,21	0,19
Time Indirect	R2	0,95	0,97	0,74	0,82	0,92	0,93	0,81	0,85
	RMSE	9,53	7,59	14,92	12,42	45,13	41,99	65,54	59,14
	MAE	3,80	3,45	7,07	6,36	24,78	21,92	44,04	40,49
	MAPE	0,10	0,09	0,17	0,15	0,11	0,10	0,18	0,17
Time Direct	R2	0,97	0,98	0,72	0,80	0,92	0,94	0,83	0,82
	RMSE	7,70	6,54	15,43	13,00	45,20	39,40	61,63	63,17
	MAE	3,38	2,86	9,55	7,11	26,39	20,74	44,27	44,15
	MAPE	0,09	0,07	0,28	0,19	0,14	0,09	0,27	0,24
		Stop to Stop				Service Pattern			
Speed	R2	0,82	0,87	0,42	0,53	0,93	0,97	0,79	0,80
	RMSE	3,84	3,23	6,81	6,12	1,37	0,97	2,33	2,25
	MAE	2,83	2,32	5,38	4,81	0,83	0,61	1,83	1,68
	MAPE	0,13	0,11	0,28	0,25	0,05	0,04	0,10	0,09
Time Indirect	R2	0,85	0,94	0,62	0,69	0,89	0,95	0,83	0,90
	RMSE	13,66	11,21	21,23	19,09	287,87	194,55	338,13	254,51
	MAE	8,59	6,73	13,35	12,12	102,38	72,94	232,54	185,34
	MAPE	0,16	0,13	0,25	0,22	0,05	0,03	0,11	0,09
Time Direct	R2	0,94	0,96	0,65	0,71	0,89	0,96	0,84	0,86
	RMSE	11,19	9,11	20,19	18,51	284,69	179,73	327,80	305,56
	MAE	6,79	5,22	13,81	12,61	124,34	80,70	259,09	244,18
	MAPE	0,15	0,11	0,31	0,28	0,07	0,04	0,14	0,15

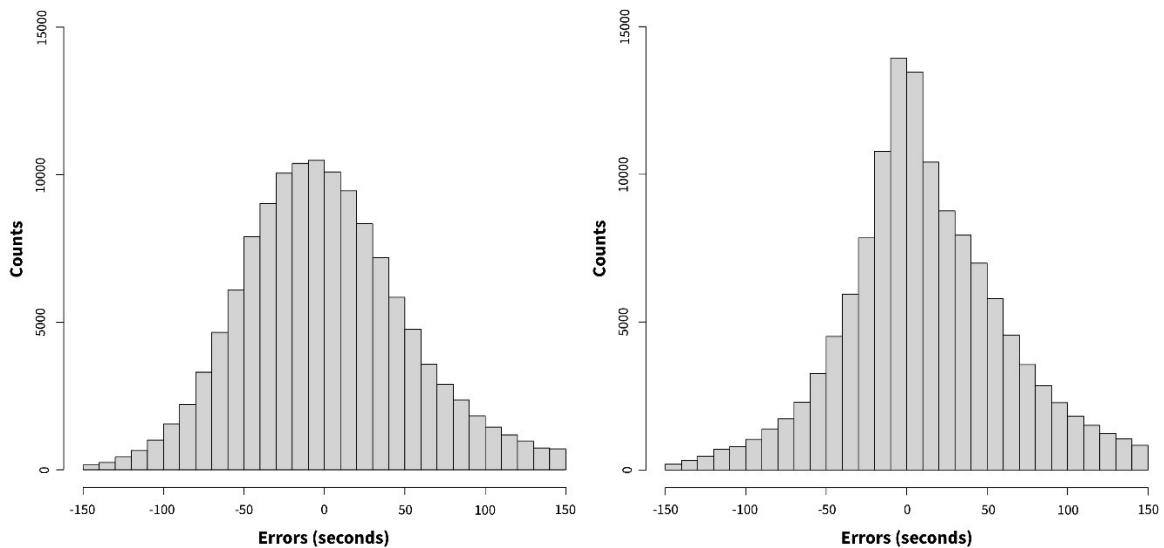


Figure 2-11. Histogramme des erreurs pour les modèles directs (gauche) et indirects (droite)

Les graphiques de la Figure 2-11 montrent les erreurs par vitesse moyenne observée. Le graphique du haut montre les erreurs moyennes selon la vitesse observée. Les erreurs conditionnelles et les



écarts-types conditionnels des erreurs sont similaires pour les deux modèles. Cependant, les erreurs en pourcentage pour les résultats indirects ont une moyenne conditionnelle et un écart-type conditionnel plus stables, et le modèle direct présente des moyennes conditionnelles et des écarts-types conditionnels plus variés pour les segments plus vites. Encore une fois, les coefficients de longueur des modèles de temps peuvent être trop restrictifs pour permettre aux modèles de s'adapter aux différentes vitesses.

Ces figures graphiques que les modèles sous-estiment le temps de parcours sur les segments les plus lents mais le surestiment sur les segments plus vites. C'est plausible puisque que les modèles ont reçu peu d'informations sur la congestion ou les horaires des feux de circulation, ce qui serait plus pertinent pour les segments les plus lents. Les segments plus vites comprennent généralement de segments longs sur les autoroutes avec peu de feux de circulation ou des secteurs sans congestion. Nous soulignons une fois de plus la nécessité d'inclure les informations des feux de circulation et les niveaux de congestion dans le processus de modélisation pour les travaux futurs.

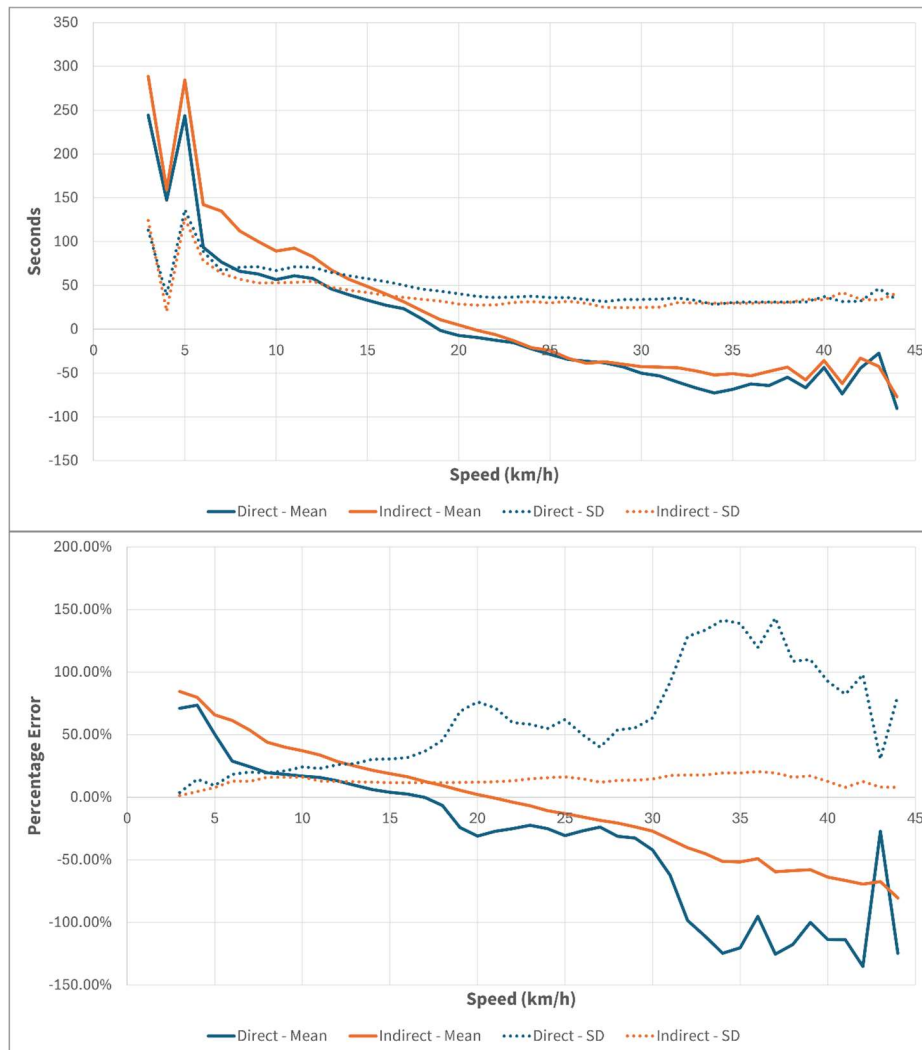


Figure 2-12. Erreurs agrégées par vitesse moyenne observée

Enfin, les graphiques de la Figure 2-13 montrent les erreurs de modélisation agrégées par longueur de segment. À partir du graphique en haut, nous pouvons voir encore une fois que les

erreurs des deux modèles sont similaires pour les segments plus longs. Mais, les erreurs et les pourcentages d'erreurs sont plus larges pour les segments courts dans les deux figures.

Les temps d'attente aux feux de circulation ou les temps d'arrêt aux arrêts deviennent une partie plus importante du temps pour les segments courts. Nous soulignons une fois de plus la nécessité d'inclure dans les modèles des données plus détaillées sur les feux de circulation et l'achalandage. De plus, des segments plus courts correspondent aux services locaux où les véhicules effectuent chaque arrêt. Donc, les planificateurs de transports en commun doivent tenir compte de leur contexte de planification spécifique, pour spécifier les attentes quant aux erreurs. Il est essentiel de réfléchir davantage à la mesure la plus appropriée selon le contexte spécifique, puisque les différentes mesures évaluent les résultats « sous différents angles » (Kolassa, 2020).

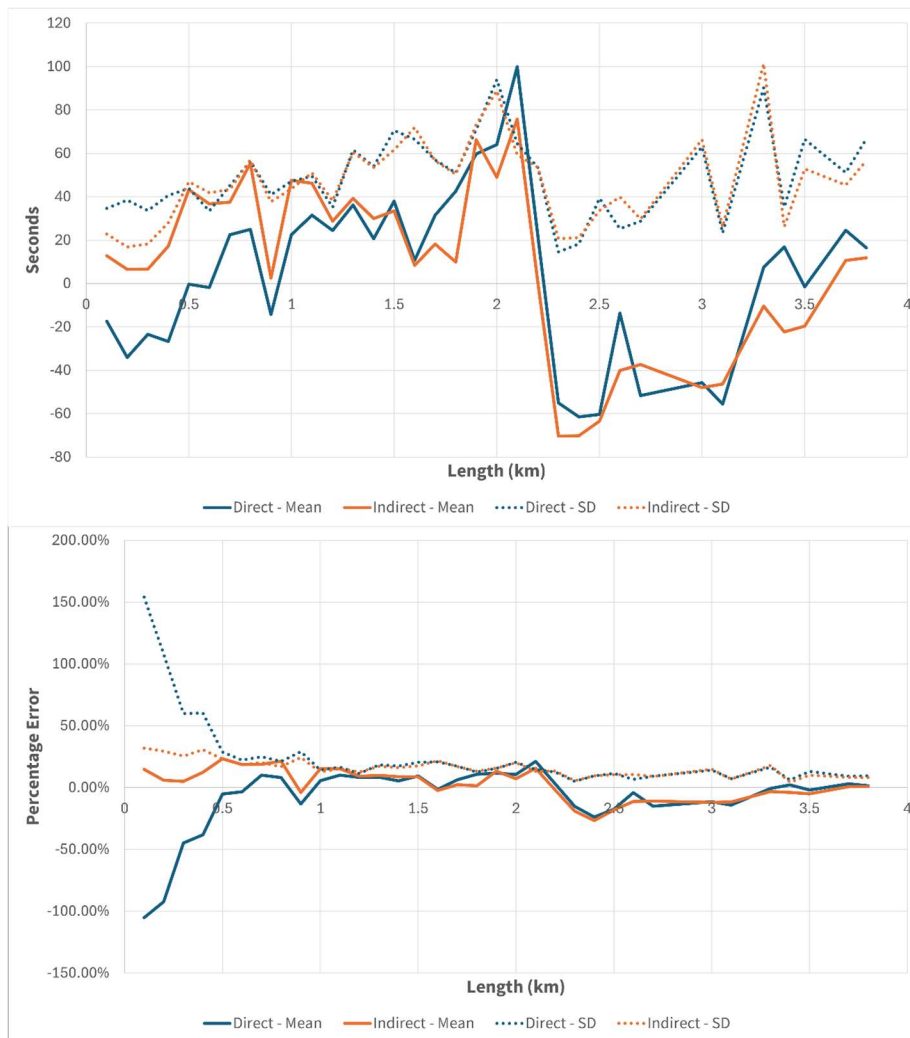


Figure 2-13. Erreurs agrégées selon la longueur du segment

### 2.1.3.6 Conclusion

En résumé, de bonnes estimations des temps de parcours sont importantes pour les sociétés de transport et pour les passagers. Cependant, les temps de parcours dépendent de la distance et de la vitesse. Étant donnée une vitesse constante, les parcours plus longs auront des temps de parcours plus longs. De même façon, pour une même distance, des vitesses plus élevées

résulteront en des temps de parcours plus courts. Il est donc possible d'utiliser les deux types de données à des fins de planification.

La plupart des publications antérieures se concentrent sur les temps de parcours. Les vitesses de parcours sont généralement utilisées pour évaluer les services fournis ou pour planifier les infrastructures. Nous posons donc la question suivante : comment comparer l'efficacité de ces mesures communes de transport en commun lorsque nous planifions ou modélisons un système de transport en commun ?

Il existe aussi de nombreux niveaux d'analyse des services de transport en commun. Les pratiques actuelles de planification se concentrent généralement sur les temps de parcours entre deux points de contrôle ou entre deux terminus. Les passagers se concentrent généralement sur le temps de parcours et l'heure d'arrivée à des arrêts spécifiques. Nous considérons également que le niveau inter-arrêt peut être plus approprié pour comprendre les conditions de déplacement car il ne dépend pas fortement de la synchronisation des feux de circulation et des temps d'arrêt.

Dans ce document, nous avons donc proposé un cadre pour calculer et comparer les mesures de temps de parcours ou de vitesse utilisées par les agences de transport en commun à différents niveaux d'analyse. Pour tester ces mesures, nous avons élaboré deux scénarios. Le premier scénario consiste à modifier les services en utilisant les nouveaux parcours, et le deuxième consiste à tester de nouvelles heures de service pour les services existants.

Nos modèles simples montrent que les résultats de la modélisation sont conformes à nos attentes. Nos évaluations montrent que les modèles non-linéaires sont légèrement plus performants. Les temps de parcours et les vitesses des transports en commun sont fortement influencés par des variables temporelles, comme l'heure de la journée, des variables spatiales, comme la classification des rues et le nombre de feux de circulation, ainsi que des variables opérationnelles, comme la fréquence des services et le nombre d'usagers. Cependant, la plupart des autres variables spatiales, comme l'utilisation du sol, ne sont pas significatives pour les modèles de temps. Les coefficients des modèles de temps sont l'inverse de la vitesse, et ils sont peut-être trop restrictifs pour tenir compte de l'évolution de la longueur des segments et des vitesses.

Les variables spatiales, temporelles et opérationnelles peuvent expliquer beaucoup mieux les niveaux d'analyse plus longs, tels que les niveaux entre deux points de contrôle. Pour les niveaux plus courts, le niveau inter-arrêt donne de meilleurs résultats. Ces résultats montrent que les analyses aux niveaux plus longs peuvent cacher des variations plus détaillées aux niveaux plus courts.

Les segments pour lesquels il existe des observations peuvent être très utiles lorsqu'on essaie de modéliser les nouvelles heures de service, puisqu'ils ont une ordonnée à l'origine spécifique au segment pour tenir compte des différences entre les segments. Les résultats indirects des modèles de vitesse fonctionnent généralement mieux pour les scénarios de nouvelles routes, étant donné l'absence d'ordonnées à l'origine spécifiques aux segments. Les planificateurs pourraient se référer à des segments existants et similaires lors de la planification d'un nouveau parcours. Par conséquent, nous insistons sur la nécessité d'inclure dans les processus de modélisation des temps d'arrêt et des horaires des feux de circulation, afin d'améliorer les modèles. En plus, les temps d'arrêt et les horaires des feux de circulation sont liés aux temps, et les conditions de voyage sont liées à la vitesse. Ainsi, prochains travaux pourraient également tester un modèle hybride en utilisant la vitesse détaillée entre les arrêts, l'horaire des feux de circulation, les temps d'arrêt, etc.

Nous soulignons également les risques liés à l'utilisation d'une seule mesure agrégée spécifique dans la littérature précédente, parce que les différentes mesures évaluent les résultats « sous des angles différents » (Kolassa, 2020). Une analyse plus désagrégée des erreurs montre que les modèles de vitesse ont tendance à sous-estimer les temps de parcours moyens, car les vitesses sont moins affectées par les valeurs extrêmes, telles que les événements météorologiques. Les deux modèles présentent des performances similaires en termes d'erreurs moyennes. Cependant, les modèles de vitesse sont relativement plus performants et plus cohérents par rapport aux valeurs réelles. Les modèles de temps ont plus de difficultés avec les segments ayant une vitesse plus élevée ou une distance plus courte. Ainsi, les planificateurs de transport en commun et les futurs chercheurs pourraient expérimenter ces mesures afin de choisir un bon modèle selon le contexte de planification spécifique.

## 2.1.4 Modélisation des déterminants de la demande multimodale et de sa variabilité

Par : Bita Farokhian, doctorat

Supervision : Pre Catherine Morency

Contexte : Chaire Mobilité / CRC Mobilité des personnes

Fin prévue : avril 2026

### 2.1.4.1 Introduction

L'épidémie de COVID-19 a eu des impacts sans précédent sur les modèles de demande de déplacements en Amérique du Nord. Étudier ces modèles avant et pendant la COVID-19, en plus d'analyser la persistance de comportements spécifiques de déplacements multimodaux après la COVID, est un sujet important car il offre aux décideurs politiques la possibilité d'explorer des options de transport durable pour les déplacements quotidiens au lieu de se fier uniquement aux voitures individuelles. Cela incite également à envisager comment les transports publics peuvent s'adapter et répondre à la demande de déplacements changeante après la pandémie. En d'autres termes, il est important de mieux connaître la variabilité de la demande de déplacements dans les systèmes de transport multimodaux post-COVID.

Comme mentionné, pendant la COVID-19, de grands changements dans la part modale des modes de transport se sont produits en raison des contraintes de santé publique et des perceptions quant aux risques de contamination. En conséquence, des recherches aux États-Unis montrent que seulement 29% des personnes percevaient les véhicules motorisés privés comme posant un risque modéré à élevé de contagion. Cependant, les services de transport avec chauffeur étaient perçus comme risqués par 89% des répondants, et les transports en commun étaient considérés comme risqués par 93% d'entre eux, correspondant au taux le plus élevé. Il est à noter que parmi les personnes qui percevaient les transports en commun comme risqués, plus de 26% n'avaient pas un accès régulier à un véhicule privé (Shamshiripour et al., 2020). La même étude indiquait que seulement 23% des répondants considéraient le cyclisme comme ayant un risque moyen à élevé et que plusieurs pays observaient une augmentation des modes actifs et individuels, et du cyclisme en particulier pour des raisons de loisirs (Buehler & Pucher, 2021 ; Das et al., 2021). Bien que le nombre total de déplacements ait diminué, parmi ceux effectués pendant la COVID, plusieurs études montrent que les transports en commun ont été considérés comme le mode le plus impacté pendant la COVID. En 2020, on observait une diminution allant jusqu'à 60% de la fréquentation pré-COVID dans des villes de Floride et une baisse de 60 à 90% de la capacité dans certains pays pour respecter la distanciation sociale de 1 à 2 mètres (Gkiotsalitis & Cats, 2021).

Le changement modal n'a pas seulement touché les transports en commun, il a également affecté d'autres modes. Les taxis n'ont pas fait exception. Zheng et al. (2020) ont réalisé une évaluation spatiotemporelle de la demande et de l'offre de taxis à Shenzhen, en Chine, en utilisant des données allant de janvier 2020 à mars 2020, les premiers mois de la COVID en Chine. Leurs résultats suggèrent qu'après la réouverture et l'annulation de certaines limitations pendant les périodes de confinement, l'augmentation relative de la demande de taxis a été inférieure à celle des véhicules privés.

Il y a des préoccupations majeures pour la reprise de l'utilisation de certains modes tels que les transports en commun, les taxis et les modes partagés. Certains pays ont brusquement réduit leur niveau de service et d'offre, cependant certaines villes comme Montréal ont maintenu le même niveau de service. En général, compte tenu des changements de demandes et des modèles de déplacements, il y a une préoccupation significative que, à mesure que la demande de déplacements augmente potentiellement après la COVID, la capacité du système de transport, en

particulier pour les modes qui ont connu une réduction de capacité, ne soit pas suffisante pour répondre à l'augmentation de la demande (Ciuffini et al., 2023).

La variabilité croissante de la demande de déplacements post-COVID et les nouvelles tendances de fréquentation complexifient la tâche de planification des transports. Plusieurs défis qui n'ont pas encore été abordés dans ce domaine:

- La variabilité de la demande dans un contexte unimodal et multimodal devrait être étudiée pour surveiller la variabilité et les changements dans tous les modes de transport de l'avant-COVID à l'après-COVID.
- Une analyse dynamique de la demande et de l'offre devrait être conduite pour suggérer des politiques adaptées pour suivre la reprise de l'utilisation des modes après la COVID. L'élasticité croisée pour l'interaction de l'offre et de la demande dans un système multimodal devrait aussi être étudiée.
- La variabilité observée ne montre pas la demande totale. Par conséquent, nous avons besoin d'une définition complète de la demande latente et d'un modèle capable d'estimer la demande totale de déplacements incluant la demande potentielle.

Sur la base des lacunes précédentes, cette recherche se concentre sur l'investigation de l'impact de la COVID-19 sur la variabilité de la demande de déplacements multimodaux en tenant compte des interactions entre les modes, de l'impact du niveau de service sur la demande et de la demande latente. La Figure 2-14 montre le cadre de l'étude. Dans les sections suivantes, l'objectif de la recherche, la revue de la littérature, la méthodologie, les résultats préliminaires et les conclusions sont détaillés.

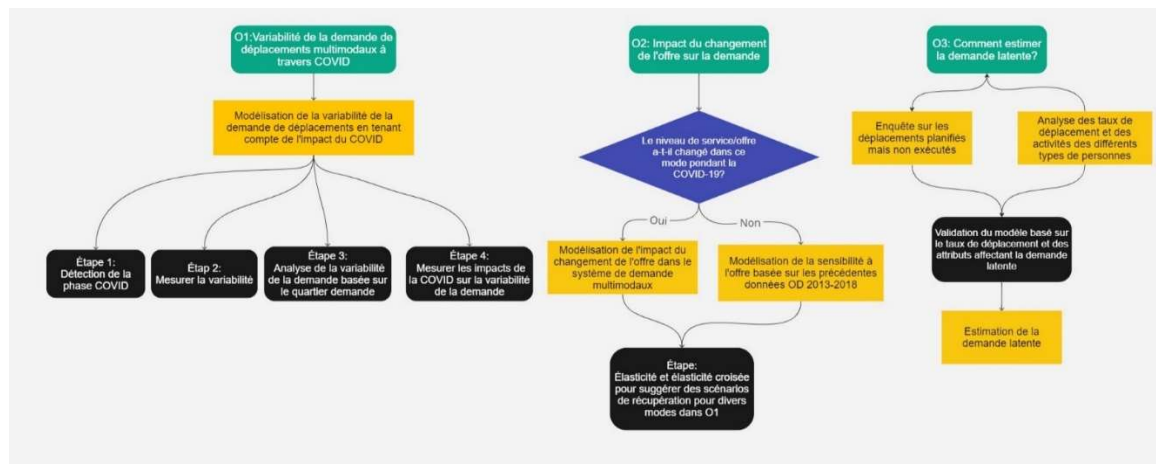


Figure 2-14. Cadre général de l'étude

### 2.1.4.2 Revue de littérature

#### Impact de la COVID sur les modèles de demande de déplacements

De nombreuses études ont investigué les effets de la COVID-19 sur le comportement de déplacement et la demande de déplacements pour chaque mode de transport séparément et dans un contexte multimodal. Zhang et Cheng (2022) ont mené une étude sur la façon dont la pandémie de COVID-19 a affecté la mobilité multimodale et comment ces changements ont influencé la décarbonation des transports (Zhang & Cheng). Leurs résultats révèlent des changements significatifs dans les modèles de circulation après la pandémie et les confinements associés. Ils ont découvert que les déplacements en voiture sont restés relativement stables tout

au long de la pandémie, tandis que les transports en commun ont connu une diminution significative. Initialement, le cyclisme et la marche étaient des modes populaires, mais cette tendance n'a pas persisté à mesure que la pandémie se poursuivait et que les saisons changeaient. D'autres études confirment également que cet impact significatif sur les transports en commun est observable dans d'autres pays ; cela peut résulter de la préoccupation des gens concernant le risque perçu élevé d'infection en utilisant les transports en commun, du télétravail, des restrictions gouvernementales et de la réduction du service due à cette diminution de l'utilisation des transports en commun (Basbas et al., 2021).

L'analyse des données temporelles et la mise en œuvre de la détection de points de changement (CPD) ont montré des résultats prometteurs pour capturer les tendances non stationnaires dans les modèles de demande de fréquentation du métro. Cette méthode, associée à la moyenne mobile intégrée autorégressive (ARIMA), a été appliquée (Moghimi et al., 2022) pour étudier l'impact de la COVID sur la fréquentation du métro à New York. L'application de l'analyse des séries temporelles ne s'est pas limitée à l'analyse de la demande de transports en commun, mais a également montré une applicabilité dans la modélisation de la demande de cyclisme. Roy et al. (2023) ont conçu un cadre pour la détection de points de changement capable de gérer de grandes quantités de données ; ils ont capturé les changements horaires et mensuels dans les déplacements à vélo.

Deschaintres et al. (2022a) ont également étudié l'impact de la COVID-19 sur la fréquentation du métro en interaction avec d'autres modes, notamment l'autopartage, les voitures privées et le vélo dans un système multimodal en utilisant la détection de points de changement bayésiens et des modèles de séries temporelles interrompues avec erreurs autorégressives. L'ensemble de données utilisé dans cet article couvre la période de février 2020 à la fin de 2021. Les résultats indiquent que les mesures de confinement ont initialement eu un impact négatif sur l'utilisation du métro, qui a diminué avec le temps. Bian et al. (2021) estiment que la détection de points de changement non supervisée est bénéfique pour quantifier et observer l'impact des retards dans la mise en œuvre des politiques COVID sur l'utilisation du système de transport.

#### Mesures de la variabilité

Dans la littérature, les indicateurs de mesure de la variabilité sont largement utilisés dans divers domaines d'étude, y compris la variation du changement climatique, la variation des signaux médicaux, la variation des prix des actions, etc. (Sokolovsky et al., 2017). La déviation absolue moyenne (MAD) est utilisée pour comparer la variabilité sur le marché boursier et dans d'autres domaines qui se concentrent sur la déviation par rapport à la moyenne (Konno & Yamazaki, 1991). L'intervalle interquartile ou IQR (Kim et al., 2014) est un autre facteur pour mesurer et comparer la variabilité de deux séries. L'IQR est sensible à la variabilité et résistant aux valeurs aberrantes, ce qui en fait un indicateur utile pour évaluer la variabilité (Sokolovsky et al., 2017).

Le retour logarithmique absolu moyen (Voyant et al., 2015) est un autre facteur robuste principalement utilisé pour les études sur le changement climatique et les données de séries temporelles de rayonnement solaire. Le coefficient de variation (CV), ou écart type relatif (RSD), est une mesure statistique de la dispersion des points de données dans une série de données autour de la moyenne. Ces coefficients sont les plus populaires dans l'analyse spatio-temporelle (P. Heath, 2006). En fonction du type de données et des avantages et inconvénients des mesures de variabilité, un ensemble de ces mesures devrait être considéré pour évaluer la variabilité.



### Impact de l'offre et élasticité

La réduction soudaine de la capacité des transports publics pour permettre la distanciation sociale pendant la pandémie de COVID-19, associée à une diminution substantielle des déplacements totaux et à des changements dans la manière dont les gens effectuaient leurs activités, a entraîné des changements brusques dans les types de transport utilisés par les habitants des villes du monde entier (Ciuffini et al., 2023). Cependant, certaines villes n'ont pas modifié l'offre pendant la COVID, comme Montréal.

Plusieurs études ont été menées sur l'impact de la réduction ou de l'amélioration de l'offre sur la demande de déplacements. Deschaintres et al. (2021) ont étudié l'impact de l'amélioration de l'offre sur le comportement de déplacement multimodal en utilisant l'indice de Dalton comme représentant du comportement de déplacement multimodal et un modèle de différence en différence. Leurs résultats ont montré qu'en tenant compte des attributs sociodémographiques et spatiaux, l'augmentation de l'offre augmenterait significativement le niveau de multimodalité. L'élasticité est utilisée pour observer l'interaction entre les coûts de déplacement et la demande de déplacements ; cela reflète combien un changement dans le coût de déplacement peut changer la demande de déplacements. Ce contexte peut être discuté pour l'impact du coût d'un bien sur la demande d'un autre bien, ce qui signifie que le coût de déplacement d'un mode de transport peut avoir un impact sur la demande de déplacement d'un autre mode, ce qui est appelé élasticité croisée (Litman, 2017b).

En se référant au coût monétaire des déplacements, une étude récente a examiné l'élasticité des changements de mode dans le comportement de déplacement, en fonction du coût de déplacement et du niveau de revenu des utilisateurs. La technique du ratio de rétrécissement, la méthode de l'élasticité de l'arc au point médian et la méthode de l'élasticité logarithmique de l'arc ont été utilisées pour calculer l'élasticité en plus de la régression logistique binaire (Vasudevan et al., 2021). Beaudoin et Lawell (2018) ont utilisé l'analyse de l'élasticité croisée pour observer l'impact du changement de l'offre de transport public sur la demande de déplacement en automobile en utilisant l'approche des variables instrumentales (IV). Leurs résultats montrent qu'une augmentation à court terme de l'offre de transports publics de 7% peut réduire les déplacements en voiture de 10%.

### Demande Latente

La demande latente est la demande qui n'est pas satisfaite ou qui se réfère aux déplacements supplémentaires qui pourraient se produire si les conditions de déplacement étaient améliorées (réduction de la congestion, augmentation des vitesses de conception, diminution des frais ou coûts des véhicules) (Litman, 2017a). Bellemans et al. (2009) affirment que l'existence de déplacements supprimés suggère qu'il existe une demande de transport cachée ou latente. À partir de cela, ils ont mené une enquête collectant les attributs des déplacements planifiés et exécutés pour exploiter les caractéristiques importantes impactant les déplacements basés sur les activités supprimées. Leurs résultats montrent que pendant un déplacement, l'omission d'activité et le type d'activité impactent significativement les déplacements supprimés.

Les études sur la demande latente spécifique à un mode accompagnent les évaluations des voyageurs qui pourraient être plus exposés à des modes non désirés, ce qui aide à reconnaître les voyageurs potentiels qui font face à une demande latente. Certaines études prennent en compte la distance de déplacement, le temps de déplacement et l'accessibilité du mode pour reconnaître les passagers confrontés à une demande non satisfaite. Par exemple, une étude récente a simulé la demande latente avec un modèle d'optimisation bi-niveau pour les déplacements en voiture individuelle, les déplacements domicile-travail, et les déplacements commençant entre 6h et 10h

(Guan et al., 2022). Une autre étude confirme également que les résidents des zones suburbaines sont les groupes les plus susceptibles d'avoir une demande latente pour les déplacements piétonniers (Vernez Moudon et al., 2002). Morency et al. (2020) ont étudié les déplacements latents à pied et à vélo à Montréal. Ils ont introduit une méthodologie pour reconnaître les déplacements qui peuvent être effectués à pied et à vélo. Ils ont d'abord estimé les distances seuils que les individus peuvent parcourir en fonction de l'âge et du sexe, puis ont reconnu les déplacements latents qui auraient pu être effectués à pied et à vélo en fonction de la distance.

Ferenchaka et Marshall (2020) ont étudié les déplacements supprimés des élèves pour les modes de marche et de vélo. Ils ont utilisé une enquête sur les autorisations parentales pour reconnaître les taux de déplacements supprimés en se concentrant sur les attributs du réseau, notamment la vitesse, les pistes cyclables, les trottoirs et le volume de voitures. Comme discuté, les études sur la demande latente se sont limitées à des modes, activités ou groupes spécifiques et il n'existe pas de méthode complète capable de capturer la demande latente totale.

#### 2.1.4.3 Méthodologie

Dans ce chapitre, les trois principales étapes méthodologiques seront expliquées :

- Analyser la variabilité de la demande des différents modes de transport à travers la COVID (y compris les données avant COVID, pendant COVID et après COVID).
- Modéliser l'interaction entre le changement de niveau de l'offre et la variabilité de la demande de déplacements pour chaque mode et les différents modes en interaction.
- Estimer la demande latente totale et modéliser ses déterminants.

#### Données

Dans cette étude, différentes sources de données passives sont utilisées pour faire le suivi de la variabilité de la demande de plusieurs modes de transport. Les données passives qui seront utilisées dans cette étude incluent les données sur le partage de vélos (ensemble de données BIXI), le partage de voitures (Communauto), ainsi que les données de validation des entrées dans les bus et le métro fournies par la Société de transport de Montréal (STM), en plus des déplacements quotidiens en taxi. Les ensembles de données passives couvrent la période de janvier 2019 à avril 2023. Les données des enquêtes Origine-Destination de Montréal de 2013 et 2018 seront utilisées pour les deuxième et troisième objectifs.

#### Impact de la COVID

Dans cette étude, la détection de points de changement non supervisée est suggérée pour implémenter la segmentation temporelle et la détection de phases dans chaque mode. Parmi de nombreux algorithmes, les techniques basées sur le clustering, les méthodes du rapport de vraisemblance et la détection de points de changement bayésiens ont été utilisées dans les études de transport. Cependant, parmi les méthodes probabilistes, le processus gaussien (GP) est plus complexe et précis que la détection de points de changement bayésiens (BCPD), étant donné que le GP utilise les observations disponibles depuis le premier pas de temps jusqu'au temps  $t - 1$  pour détecter les points de changement, tandis que la BCPD utilise les observations de l'état précédent uniquement (Aminikhanghahi & Cook, 2017). Sur la base de ce qui a été mentionné ci-dessus, le processus gaussien a été choisi parmi les méthodes probabilistes.

La méthode de détection de points de changement basée sur les noyaux proposée par Harchaoui & Cappé (2007) examine le signal de séries temporelles  $y$  sur un espace de Hilbert à noyau reproduisant (RKHS)  $H$  associé à une fonction noyau définie par l'utilisateur,  $k(y_t, \cdot)$ , et la fonction de représentation est définie comme suit (Harchaoui et al., 2008) :

$$\phi(y_t) = k(y_t, \cdot) \quad \text{Eq (1)}$$

Où dans Eq(1),  $\phi(y_t)$  est la fonction de représentations au temps  $t$  du signal  $y$ . La fonction noyau est définie par l'utilisateur et les noyaux les plus importants (Shawe-Taylor & Cristianini, 2004) qui sont testés dans ce projet sont élaborés comme suit dans Eq (2) :

- kernel linéaire:

$$k(x, y) = x^T y : x, y \in \mathbb{R}^d \quad \text{Eq(2)}$$

Kernel gaussien (fonction de base radiale)

$$k_{\text{Gaussian}}(x, y) = \exp(-\gamma \|x - y\|^2) \quad \text{Eq(3)}$$

où  $\| \cdot \|$  est la distance euclidienne, et  $\gamma$  est un facteur positif défini par l'utilisateur. En fonction du type de noyau, la fonction de coût est conçue et la fonction de coût du noyau gaussien ou fonction de bases radiales (RBF) est conçue comme suit :

$$C_{\text{rbf}}(y_{a..b}) = (b - a) - \frac{1}{b-a} \sum_{s,t=a+1}^b \exp(-\gamma \|(y_s - y_t)^2\|) \quad \text{Eq(4)}$$

Pour optimiser la fonction de coût, les algorithmes Pruned Exact Linear Time (Killick et al., 2012) (algorithmes Pelt et détection optimale en utilisant la programmation dynamique (Opt)) sont suggérés et ils sont tous deux inclus dans le package Python ruptures (Truong et al., 2018). La méthode Pelt utilise un facteur pénalisé dans la fonction de coût pour trouver la fonction de coût minimale dans la détection de points de changement. Pelt est souvent utilisé lorsque le nombre de points est inconnu et Opt est applicable lorsque le nombre de points ou de segments est connu. Dans notre cas, Pelt est utilisé pour trouver le coût optimal. Pour trouver la meilleure valeur de pénalité, les critères de l'information bayésienne (BIC) et les méthodes du coude sont suggérés en fonction du coût pénalisé (Cryer, 1986 ; Hastie et al., 2001 ; Killick et al., 2012).

Certains indicateurs ont été choisis pour comparer la variabilité de la demande à travers la COVID. Les mesures et indicateurs de variabilité sont (Brillinger, 2001; Sokolovsky et al., 2017) :

- Déviation absolue moyenne (MAD): la moyenne des déviations absolues par rapport à la moyenne au sein de la fenêtre temporelle ou des phases définies.
- Entropie d'échantillon: mesure utilisée pour quantifier la régularité et l'imprévisibilité des fluctuations dans les données de séries temporelles.
- Coefficient de variation (CV): le rapport de l'écart-type à la moyenne, qui fournit une mesure relative de la variabilité ; cela permet une comparaison pratique entre des séries temporelles de différentes échelles.
- IQR ou intervalle interquartile: représente l'intervalle entre le premier et le troisième quartile d'un ensemble de données, capturant les 50% centraux des données.

Pour mieux étudier l'impact de chaque phase sur l'utilisation des modes et estimer la variabilité pour les données non observées, il est suggéré d'utiliser les phases comme variable d'entrée du modèle de séries temporelles qui estime la fréquentation du métro. Les modèles statistiques tels que les modèles de séries temporelles ARIMA ou VAR (régression vectorielle auto-régressive) ne sont pas des méthodes de type "boîte noire" et sont interprétables en fournissant un coefficient des variables indépendantes et en montrant l'autocorrélation entre les variables. Cependant, les modèles de séries temporelles d'apprentissage automatique et d'apprentissage profond sont

également proposés car ils sont plus précis dans le cas de relations complexes et non linéaires entre les variables.

Maintenant, la variabilité de la demande est comparée à travers les phases de la COVID, et les modes ayant subi un niveau élevé de variabilité de la demande ont été détectés. Une question importante qui reste est de savoir si ce niveau de variabilité est le même dans différents quartiers. Les données longitudinales fournies dans ce projet incluent l'emplacement des stations, ce qui aidera le processus d'analyse des quartiers dans les mêmes phases identifiées au niveau précédent. Certaines études ont investigué des méthodes de clustering en tenant compte des caractéristiques temporelles et spatiales des modèles de déplacement pour exploiter les quartiers ayant les mêmes modèles de déplacement (T. Liu et al., 2019).

Après avoir attribué les emplacements des stations aux quartiers, la régression géographiquement pondérée (GWR) ou les modèles à effets mixtes peuvent être mis en œuvre pour observer la variabilité de la demande dans différents quartiers. Les caractéristiques des quartiers peuvent également être prises en compte dans le modèle en tant que variables exogènes.

#### Impact de l'offre

L'impact du changement de niveau de l'offre sur la variabilité de la demande est étudié en utilisant des modèles statistiques de séries temporelles avec des variables exogènes et des méthodes d'apprentissage automatique. Pour les cinq modes d'étude, y compris l'autopartage, le vélopartage, le métro, le taxi et le bus, la variable de changement de niveau de l'offre à travers les phases de la COVID est d'abord définie et ajoutée au modèle de demande de séries temporelles précédemment proposé. En utilisant les coefficients des modèles, une analyse de l'élasticité (impact d'un changement de l'offre sur la demande du mode de transport) et de l'élasticité croisée (impact d'un changement de l'offre d'un mode sur la demande d'un autre mode) est fournie pour proposer des scénarios de reprise basés sur l'augmentation de l'offre de service de différents modes de transport.

#### Demande Latente

Dans cette étude, nous avons fourni une définition complète de la demande latente comme indiqué à la Figure 2-15.

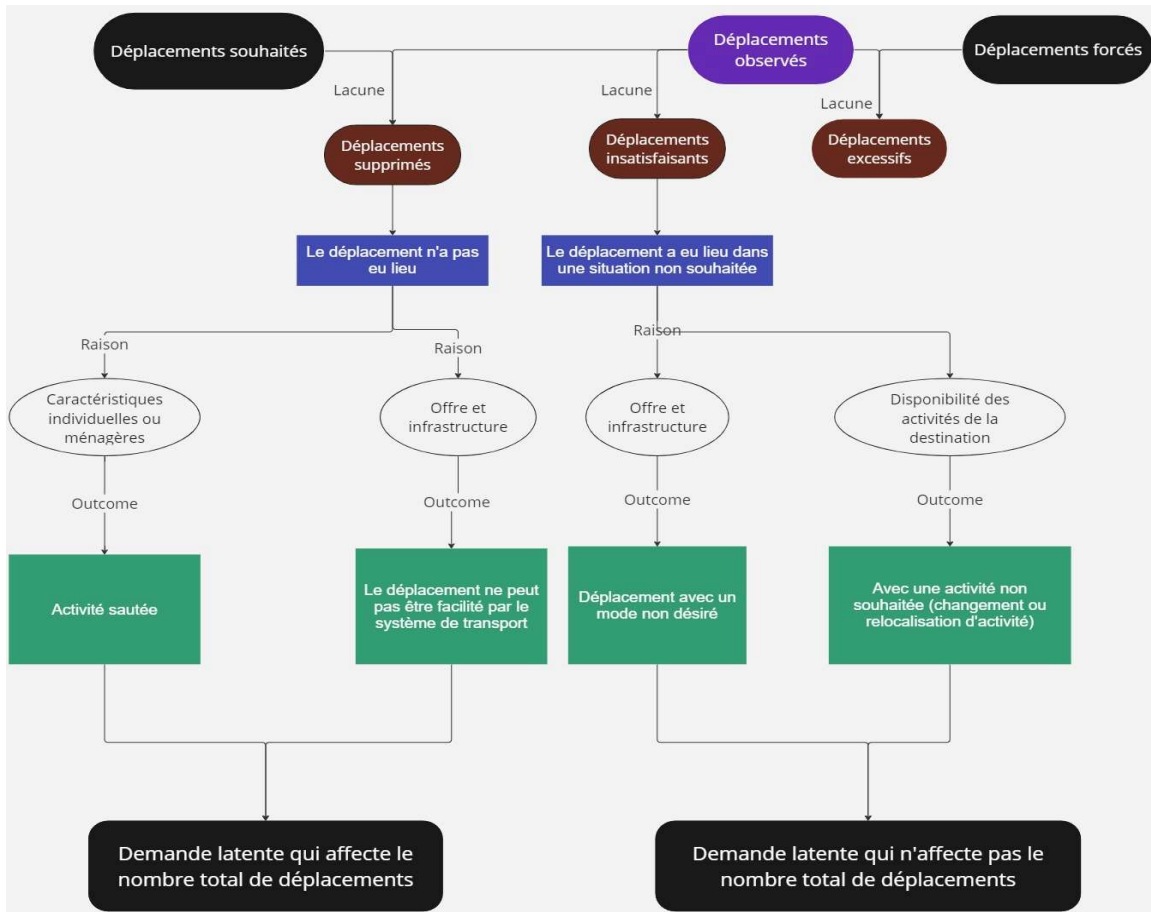


Figure 2-15. Définition complète de la demande latente totale

Les déplacements sont catégorisés en déplacements souhaités, déplacements observés et déplacements forcés. Les déplacements supprimés correspondent grosso modo à une demande latente (Bellemans et al., 2009). Dans le cas des déplacements supprimés (Groupe 1), les déplacements n'ont pas eu lieu. La première explication pour ces déplacements supprimés serait les caractéristiques individuelles ou du ménage (G1-r1) qui poussent les gens à sauter l'activité (G1-o1). Dans le cas des déplacements insatisfaisants (Groupe 2), le déplacement a eu lieu mais il n'a pas pu se dérouler selon les conditions idéalement souhaitées. L'insatisfaction (G2-r1) pourrait provenir du faible niveau de service, tel que l'inaccessibilité au mode souhaité, la pénurie d'offre au moment du départ, ou des raisons infrastructurelles, par exemple un système routier inefficace pour atteindre la destination ou l'absence de pistes cyclables.

Dans la première étape, les taux de déplacement peuvent être étudiés en utilisant la typologie proposée par Deschaintres et al. (2021) qui ne prend pas en compte le type d'activité. Comme mentionné précédemment, la première raison des déplacements supprimés est liée aux caractéristiques des ménages et des individus, et la deuxième raison est liée au niveau de l'offre et aux infrastructures, qui sont toutes deux couvertes par la typologie des quartiers et des ménages. En utilisant des techniques de clustering, les taux de déplacement seront comparés en examinant différents types de quartiers et de ménages. Nous supposons que les personnes appartenant à un groupe spécifique devraient se comporter de la même manière.

L'analyse des taux de déplacement peut fournir une base pour estimer la demande latente, cependant, elle est associée à des hypothèses. Pour clarifier si un déplacement est supprimé, une

enquête est nécessaire pour identifier clairement les déplacements qui étaient planifiés mais n'ont pas eu lieu, ou les déplacements que les gens souhaiteraient pouvoir faire. Dans ce projet, une version plus complète de l'enquête est suggérée, qui contient non seulement les journaux de déplacements planifiés et non exécutés, mais aussi les déplacements insatisfaisants en termes de niveau de service et de localisation des activités. Cela pourrait inclure des questions supplémentaires dans les déplacements exécutés si les personnes devaient changer une partie de leurs déplacements (mode, activité ou destination).

#### 2.1.4.4 Résultats préliminaires

Dans les parties suivantes, certains des résultats préliminaires du premier objectif, liés à la variabilité de la demande du métro, ont été fournis. Les résultats seront mis à jour pour tous les modes et les mesures de variabilité seront calculées. Les données du métro sont calculées à partir de la validation des entrées dans le métro de Montréal, comprenant 4 lignes et 68 stations. L'ensemble de données n'est pas agrégé aux montants quotidiens, ce qui implique que les montants de validation montrés sont basés sur les données de chaque station. Étant donné que dans la première étape, l'étude ne se concentre pas sur l'analyse spatio-temporelle, les données sont agrégées au niveau quotidien. La distribution des validations dans les stations de métro (incluant bornes inférieure et supérieure avec un écart type) est représentée dans la Figure 2-16. Comme le montrent les données, il y a un changement brusque de tendance qui peut être observé au cours des premiers mois de 2020, ce qui correspond au début de la COVID à Montréal.

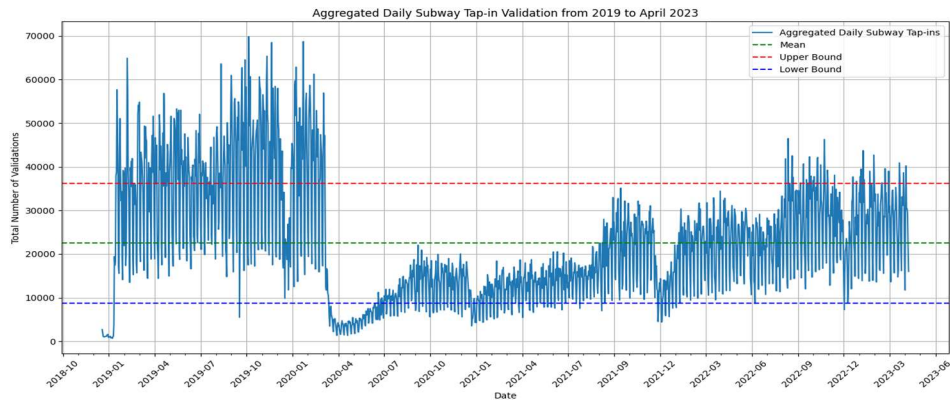


Figure 2-16. Distribution des données avec des bornes supérieure et inférieure d'un écart type

Avant de commencer à appliquer les méthodes de détection de points de changement, un certain nettoyage des données a été effectué. Par exemple, les jours fériés et les week-ends sont catégorisés comme des jours non ouvrables, et les autres jours de la semaine sont étiquetés comme des jours ouvrables. En conséquence, la variable « type de jour » a été ajoutée à l'ensemble de données et sera utilisée comme caractéristique exogène dans les modèles de séries temporelles. Une simple comparaison du changement de la fréquentation moyenne entre les jours non ouvrables et les jours ouvrables est fournie dans le Tableau 2-11. Chaque ligne montre le pourcentage de changement de la moyenne de chaque paire d'années consécutives.

Tableau 2-11. Changement de la moyenne de la fréquentation quotidienne entre chaque paire d'années

Year	Business Day Ridership Change (%)	Non-Business Day Ridership Change (%)	Total change (%)
2020-2019	-54.85	-54.29	-57.33
2021-2020	-0.34	-3.28	13.69
2022-2021	50.14	50.07	50.44

Comme le montre le Tableau 2-11, la fréquentation moyenne des jours ouvrables a diminué de 55 % en 2020 par rapport à 2019, mais ce n'était pas le cas en 2021 lorsque la situation de la COVID était presque la même qu'en 2020. Cependant, la moyenne n'est pas une mesure concluante lors de la comparaison de données de séries temporelles avec des modèles différents. D'autres mesures de variabilité seront incluses pour comparer chaque segment de temps ou phase de la COVID. Après le nettoyage des données, un test de normalité est nécessaire avant toute étape statistique. Le test de normalité de Shapiro (Shapiro et al., 1968) est mis en œuvre en Python et le résultat montre que la valeur  $p$  ( $2.44e-23$ ) est très petite et rejette l'hypothèse nulle; les données ne sont donc pas normales. À cet égard, le logarithme de la fréquentation est utilisé pour traiter le problème d'anormalité tout en conservant les caractéristiques des données de séries temporelles.

La première méthode mise en œuvre est la détection de points de changement basée sur les noyaux. Les coûts du noyau linéaire et du noyau gaussien ont été testés et les méthodes d'optimisation sont le PELT pénalisé (Killick et al., 2012). Pour la quantité de pénalité, les critères BIC et la méthode du coude sont appliqués pour choisir la pénalité. Deux ensembles de données, l'un excluant les jours non ouvrables et l'autre incluant les jours ouvrables, ont été considérés. Les Figure 2-17 et Figure 2-18 montrent les résultats de la détection de points de changement de fréquentation incluant les jours non ouvrables pour le coût gaussien et le coût linéaire respectivement. Comme on peut le voir, le coût linéaire s'adapte mieux puisqu'il considère 2019 comme un segment unique.

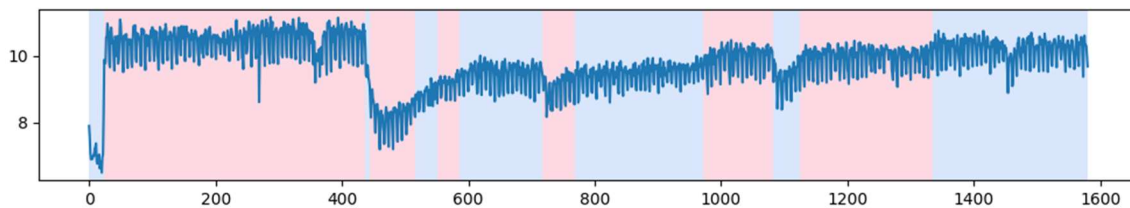


Figure 2-17. Détection de points de changement basée sur les noyaux incluant les jours non ouvrables avec coût de RBF

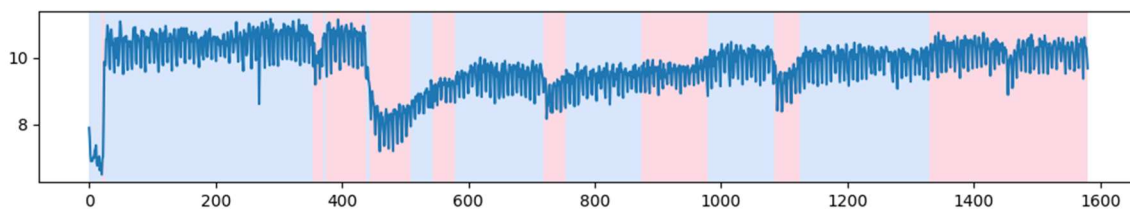


Figure 2-18. Détection de points de changement basée sur les noyaux incluant les jours non ouvrables avec fonction de coût linéaire



#### 2.1.4.5 Discussion

Comme mentionné précédemment, le premier objectif de cette étude était de modéliser la variabilité de la demande des différents modes à travers la COVID et d'observer l'impact des phases sur la variabilité de la demande. Dans la première étape, la méthode de détection de points de changement est mise en œuvre pour les données de fréquentation du métro. Après le nettoyage des données, la première méthode de détection de points de changement proposée était la détection de points de changement basée sur les noyaux avec le noyau gaussien. Les données ont montré une sensibilité aux jours non ouvrables, y compris les week-ends et les jours fériés. Tout d'abord, l'algorithme est mis en œuvre en incluant les jours ouvrables avec deux fonctions de coût linéaires et de bases radiales. La pénalité pour chaque section et les points de changement détectés sont détaillés dans le Tableau 2-12.

Tableau 2-12. Résultats de la détection de points de changement (CPD)

Pénalité	Fonction de coût	Critères appliqués pour l'arrêt	Points détectés après une modification
4	Radial basis function	Elbow Method	[438, 445, 517, 552, 587, 718, 769, 973, 1082, 1126, 1336, 1581]
15	Linear function	BIC, Elbow Method	[25, 355, 370, 375, 440, 445, 510, 545, 580, 720, 755, 875, 980, 1085, 1125, 1330, 1581]

Comme illustré dans le Tableau 2-12, en tenant compte du fait que les données commencent en janvier 2019, la fonction linéaire, même avec une valeur de pénalité plus élevée, présente encore quelques défauts. Par exemple, logiquement, les jours de 2019 devraient être dans la même phase puisque la COVID n'était pas encore commencée. Cependant, la première méthode avec des valeurs de pénalité plus faibles semble être plus précise. Il est important de mentionner que la recherche de grille et d'autres méthodes de réglage n'ont pas encore été appliquées ; même certaines modifications de second niveau peuvent être testées, comme l'altération des pas de temps minimum dans les algorithmes. De plus, les données semblent être sensibles aux jours fériés, et davantage de modifications sont nécessaires, notamment :

- Considérer le processus gaussien et la détection de points de changement bayésiens.
- Mettre en œuvre la détection de points de changement en excluant les jours non ouvrables.
- Affiner ce modèle de base et le comparer avec la chronologie de la COVID.

Ces ajustements permettront de mieux capturer les variations et les phases spécifiques associées aux différents moments de la pandémie.

## 2.1.5 Caractérisation de la complémentarité entre le vélo et le transport en commun

Par : Killian Giraudi, maîtrise

Supervision : Pre Catherine Morency

Contexte : Chaire Mobilité / CRC Mobilité des personnes

Date de fin prévue : décembre 2024

### 2.1.5.1 Introduction

La recherche sur les modes de transport durables a établi leur importance cruciale pour atténuer les impacts environnementaux et sociaux de l'urbanisation et de l'étalement urbain, en particulier dans le contexte nord-américain où la dépendance à l'automobile est profondément ancrée. Des études telles que celles de Litman (2015) ont montré que l'adoption de modes de transport tels que la marche, le vélo et les transports en commun peut réduire considérablement les émissions de gaz à effet de serre, diminuer la congestion et améliorer le bilan de santé publique.

Bien que les modes de transport durables offrent de nombreux avantages en termes de santé et d'environnement, ils rencontrent des limitations lorsqu'ils sont utilisés isolément, ce qui peut restreindre leur efficacité à répondre exhaustivement aux besoins de mobilité et constituer une alternative efficace face à l'automobile. D'abord, la question de la distance est souvent citée comme un frein majeur pour l'adoption du vélo et de la marche, particulièrement dans les contextes urbains étendus où les lieux de travail peuvent être significativement éloignés des zones résidentielles. Newman et Kenworthy (1999) soulignent que la dépendance accrue à l'automobile dans les métropoles étendues est en partie due à ces défis de distance. Ensuite, la topographie joue également un rôle crucial. Des villes avec des terrains vallonnés ou irréguliers, présentent des défis physiques supplémentaires qui peuvent décourager l'usage du vélo (Maizlish et al., 2013).

Enfin, la diversité des besoins des usagers est une autre considération importante. Les exigences en matière de transport peuvent varier considérablement en fonction de facteurs tels que l'âge, les capacités physiques et les responsabilités personnelles, rendant certains modes plus adaptés que d'autres pour différents individus. Cao, Mokhtarian, et Handy (2009) ont exploré comment ces facteurs personnels et familiaux influencent les décisions de mode de transport, montrant que les besoins individuels diversifiés nécessitent souvent des solutions de transport plus flexibles et personnalisées.

Ces aspects soulignent l'importance d'adopter une approche multimodale pour la mobilité urbaine, facilitant ainsi la combinaison flexible de différents modes de transport pour répondre à une gamme plus large de besoins de mobilité. Une telle approche pourrait non seulement maximiser les avantages de chaque mode, mais également atténuer leurs limitations individuelles, contribuant à une mobilité urbaine plus inclusive et adaptable. A ce titre, l'exploration de la complémentarité entre le vélo et le transport en commun permet de comprendre comment ces deux modes peuvent fonctionner en synergie pour créer un environnement de transport plus intégré et durable. Cette complémentarité ouvre la possibilité de surmonter certaines des limitations inhérentes à chaque mode pris isolément, notamment en termes de distance et d'accessibilité.

Une des questions centrales de cette recherche est de déterminer comment la combinaison du vélo et des transports en commun peut faciliter un transfert modal significatif, c'est-à-dire inciter les utilisateurs à délaisser la voiture au profit de modes de transport plus durables. Des études antérieures, comme celle de Martens (2007), ont montré que lorsque des infrastructures adéquates sont en place, les cyclistes sont plus enclins à utiliser le transport en commun pour

compléter leur trajet, augmentant ainsi la portée et l'efficacité des réseaux de transport public. Selon Flamm et Rivasplata (2014), l'intégration des vélos aux réseaux de transport en commun peut augmenter leur utilisation globale.

Par ailleurs, il est essentiel d'examiner comment faciliter l'accès aux transports en commun par le vélo peut étendre la portée de ces réseaux au-delà de leurs arrêts habituels, rendant le transport en commun plus accessible à une population plus large, comme l'ont démontré Pucher et Buehler (2012) dans leurs recherches sur les politiques de transport urbain.

La problématique de transporter son vélo dans les transports en commun, comme le bus, est également une question pratique importante. Les limites actuelles en termes de capacité et de facilité d'intégration des vélos dans ces modes posent des défis spécifiques qui, s'ils sont résolus, pourraient significativement augmenter l'usage combiné de ces transports. Des études comme celle de Bullock et al. (2017) montrent que l'amélioration des facilités pour emporter des vélos dans les transports en commun peut considérablement augmenter leur utilité et leur attractivité.

Enfin, il est crucial de comprendre comment la promotion active de ces deux modes en tandem peut contribuer à l'adoption de comportements de mobilité plus durables à long terme. La synergie entre le vélo et les transports en commun a le potentiel de réduire non seulement la dépendance aux véhicules personnels mais aussi de favoriser une culture urbaine plus orientée vers la durabilité et moins centrée sur l'automobile. La recherche de Shaheen et Guzman (2011) a révélé que la combinaison des vélos avec les transports en commun est un levier efficace pour promouvoir des pratiques de mobilité durable, surtout lorsqu'elle est soutenue par des politiques publiques appropriées.

#### *2.1.5.2 Objectif*

L'objectif principal de ce mémoire est d'évaluer le niveau de complémentarité entre les vélos et les transports en commun dans la ville de Montréal. Cette complémentarité se manifeste à travers plusieurs composantes clés qui seront explorées pour comprendre les interactions entre ces deux modes de transport. Premièrement, l'intermodalité TC-vélo sera étudiée pour évaluer la facilité avec laquelle les usagers peuvent combiner ces deux modes dans un même déplacement. Deuxièmement, l'analyse se portera sur les espaces partagés entre bus et vélo, tels que les voies réservées et la cohabitation sur les pistes cyclables ou les mesures préférentielles pour les TC, afin d'identifier les bénéfices et les défis de ces configurations spatiales partagées. Enfin, une attention particulière sera accordée à la complémentarité temporelle des usages du bus et du vélo, en explorant comment les choix de transport varient en fonction des conditions météorologiques, comme la pluie ou l'hiver.

#### *2.1.5.3 Revue de littérature*

##### *Intermodalité TC-Vélo*

La revue de littérature concernant l'intermodalité entre les transports en commun et les vélos dans les milieux urbains met en lumière comment l'intégration de ces deux modes peut améliorer substantiellement la mobilité urbaine, rendant les villes plus accessibles et durables. Une étude approfondie réalisée par Orozco et al. (2022) utilise des réseaux multicouches pour analyser la connectivité et l'efficacité des systèmes de transport multimodaux, soulignant les avantages potentiels de la combinaison des transports publics et des vélos dans les cadres urbains. Par ailleurs, les recherches de Hamidi et al. (2019) sur les inégalités d'accès aux installations de vélo-et-transport révèlent les facteurs socio-économiques qui influencent la réussite de telles intégrations dans des villes comme Malmö, soulignant l'importance de l'accès équitable à ces options multimodales. En complément, Oostendorp et al. (2017) discutent des bénéfices de la

mobilité intermodale pour améliorer l'accessibilité urbaine et réduire les impacts environnementaux, en utilisant Berlin comme étude de cas. De même, Gebhardt et al. (2017) analysent l'efficacité de la combinaison de différents modes de transport, y compris les transports en commun et le cyclisme, dans la réduction de la congestion routière et des émissions. Ces études mettent ensemble en évidence que, bien que bénéfiques, les systèmes de transport multimodal nécessitent des interventions politiques ciblées pour surmonter les défis structurels et sociaux et réaliser pleinement leur potentiel.

L'analyse de la complémentarité entre les vélos et les transports en commun dans les environnements urbains, tel qu'abordé précédemment, souligne l'importance de l'intégration efficace de ces modes pour améliorer la mobilité et la durabilité urbaines. Comme l'ont illustré les recherches de Flamm et Rivasplata (2014), l'accessibilité et la qualité de l'infrastructure cyclable à proximité des stations de transport en commun sont cruciales pour encourager les usagers à adopter ces modes de façon combinée. Cette prise de conscience mène naturellement à l'importance de l'évaluation spécifique du réseau cyclable autour des stations de transports en commun.

La qualité de l'infrastructure cyclable à proximité immédiate des points de transit clés peut jouer un rôle déterminant dans le choix des usagers de combiner ces modes de transport. Ainsi, comme le suggèrent Pucher et Buehler (2012), une analyse détaillée de ce réseau est essentielle pour identifier les défis existants et les opportunités d'amélioration, garantissant ainsi une transition fluide entre le vélo et les transports en commun.

Il faut comprendre que l'élément qui ressort le plus dans le choix d'un itinéraire cyclable est la sécurité. Ainsi, pour analyser la qualité d'un réseau cyclable, plusieurs méthodes peuvent être employées. Une approche efficace consiste à utiliser la théorie des graphes et le Niveau de Stress Cyclable (Level of Traffic Stress LTS) pour évaluer la connectivité du réseau et identifier les obstacles pour différents types de cyclistes. Une étude réalisée sur le réseau cyclable disponible sur OpenStreetMap à Portland, Oregon, met en lumière la nécessité d'améliorations des infrastructures pour garantir l'accessibilité à tous les cyclistes, y compris les enfants et les cyclistes moins confiants (Miah et al., 2023). En outre, les systèmes d'information géographique (GIS) peuvent être utilisés pour analyser les caractéristiques physiques des pistes cyclables et leur proximité avec les stations de transit, offrant une évaluation détaillée de la qualité basée sur l'analyse spatiale (Monteiro et al., 2013).

Si on cherche à évaluer le potentiel d'amélioration d'un réseau cyclable, une méthode qui ressort de la littérature est d'analyser l'infrastructure actuelle, d'identifier les lacunes, et d'évaluer les besoins des utilisateurs. L'une des approches utilisées est le Bicycle Network Improvement Problem (BNIP), qui vise à optimiser le réseau pour la sécurité tout en maximisant le nombre de déplacements par les cyclistes, le tout dans le cadre de contraintes budgétaires. Cette méthode utilise un programme linéaire mixte (MILP) qui prend en compte la sécurité, la distance de voyage, et les déviations de route. Une application de cette méthode à Atlanta a démontré des augmentations significatives du nombre de trajets réalisables à vélo à la suite d'améliorations apportées (Jisoon et al., 2022).

Cette méthode, bien que robuste pour l'amélioration des réseaux cyclables, présente certaines contraintes qui limitent son applicabilité pour ma recherche. En particulier, la complexité de ce modèle pourrait représenter un obstacle à un contexte où l'accessibilité et la simplicité d'utilisation sont primordiales. En conséquence, je propose de développer une autre approche qui sera moins complexe et plus facilement applicable, afin de promouvoir l'amélioration des

infrastructures cyclables de manière plus inclusive et accessible. Un des objectifs de ce mémoire sera donc de déterminer une nouvelle méthode de détermination du potentiel d'amélioration du réseau cyclable en utilisant des outils plus accessibles.

#### *2.1.5.4 Méthodologie*

Pour évaluer le potentiel d'amélioration du réseau cyclable autour des nœuds de TC de Montréal, ma méthodologie repose sur une analyse comparative entre l'accessibilité du réseau actuel et celle d'un réseau théorique maximal, entièrement accessible aux cyclistes. Le réseau actuel est défini en identifiant les rues qui répondent actuellement aux critères de confort cyclable. Le réseau maximal théorique est conçu en s'alignant sur les objectifs de Vélo Québec, envisageant un scénario où 100% des rues seraient équipées de pistes cyclables ou de dispositifs de modération de la circulation.

Il est important de souligner que le réseau maximal théorique ne représente pas un objectif en soi, mais sert plutôt de référence maximale dans notre modèle. Atteindre ce réseau maximal n'est pas nécessairement souhaitable ou utile en pratique, mais il offre un cadre utile pour évaluer les possibilités d'amélioration du réseau.

À partir de cette comparaison, un indicateur clé est développé pour quantifier le nombre de personnes vivant dans le bassin d'accessibilité de chaque nœud du réseau, avant et après les modifications hypothétiques. Cet indicateur est essentiel pour évaluer et comparer l'intérêt de renforcer le réseau cyclable autour des différents nœuds importants de transport en commun (TC), permettant d'identifier les zones où une intervention pourrait avoir l'impact le plus significatif. De plus, cet indicateur aidera à déterminer une limite potentielle à l'intérêt d'ajouter de nouvelles pistes cyclables, car il est probable que les stations bénéficiant déjà d'un bon réseau cyclable présentent un potentiel d'amélioration plus faible que celles dans des zones moins bien équipées.

Les isochrones sont l'outil choisi pour mesurer l'accessibilité lors de cette étude. Ces surfaces délimitent les zones accessibles en un temps donné à partir d'un point spécifique, et sont particulièrement efficaces pour visualiser et évaluer la portée spatiale des réseaux de transport. L'utilisation des isochrones est avantageuse pour plusieurs raisons. Premièrement, elles offrent une représentation visuelle intuitive de l'accessibilité, ce qui facilite la compréhension des dynamiques de mobilité. De plus, les isochrones permettent des analyses multimodales, comparant l'accessibilité via différents modes de transport, le mode de transport privilégié dans cette étude étant le vélo.

Toutefois, il est important de noter que les isochrones ont certaines limitations qu'il est important de considérer. Elles peuvent simplifier les conditions réelles en supposant un mouvement uniforme sans interruptions, ce qui peut ne pas refléter précisément les complexités du monde réel comme les embouteillages. De plus, comme elles sont basées seulement sur le réseau, elles ne prennent pas en compte les déplacements réels observés, ni les variations démographiques et géographiques qui peuvent influencer l'expérience de l'accessibilité par différentes populations. Il est donc important de croiser les résultats avec d'autres bases de données pour comprendre les dynamiques réelles mises en jeu. Enfin, la précision des résultats dépend fortement de la qualité des données géographiques disponibles.

Une des difficultés majeures rencontrées dans l'application de ma méthodologie réside dans la recherche d'un outil de calcul d'accessibilité qui permette de moduler le confort cyclable. De plus, la plupart des outils disponibles actuellement sont propriétaires et ne sont pas accessibles librement, ce qui représente un obstacle significatif étant donné le besoin d'un outil entièrement

libre de droits pour cette recherche. De plus, il est crucial que cet outil permette une modulation du confort cyclable selon les préférences de l'utilisateur, afin de pouvoir analyser l'impact de différents niveaux de confort sur l'accessibilité. L'outil idéal doit permettre non seulement de calculer l'accessibilité en tenant compte de divers scénarios de confort cyclable, mais aussi d'ajuster les paramètres du confort cyclable pour explorer comment des améliorations potentielles pourraient affecter l'utilisation du réseau cyclable. L'objectif est de comprendre de manière détaillée comment les variations dans la qualité des infrastructures cyclables influencent la décision des usagers de choisir le vélo comme mode de transport, en fonction de leur perception du confort et de la sécurité.

Pour l'analyse de l'accessibilité dans cette étude, une première solution qui est retenue est l'outil Valhalla, un moteur de calcul d'itinéraire dont la documentation et les algorithmes sont entièrement libres et ouverts, s'appuyant sur les données cartographiques d'OpenStreetMap. Développé à l'origine par l'équipe de Mapzen, Valhalla offre diverses fonctionnalités telles que le calcul d'itinéraires, d'isochrones, de matrices de distances, ainsi que des analyses de réseau pour différents modes de transport utilisés simultanément.

Un atout majeur de Valhalla pour notre recherche est sa capacité à générer des isochrones, ce qui est crucial pour visualiser les zones accessibles depuis un point donné dans des intervalles de temps spécifiques. De plus, cet outil permet une certaine flexibilité dans la modification des paramètres liés au confort cycliste lors des calculs. Valhalla produit des résultats sous forme de polygones ou de lignes en format GeoJSON, facilitant ainsi la visualisation des données d'accessibilité sur une carte.

Néanmoins, une limitation notable de Valhalla est que, bien que certains paramètres puissent être ajustés pour influencer le poids des coûts de trajet, la majorité des variables impliquées dans les calculs sont fixes. Cela peut restreindre la personnalisation des analyses pour des applications spécifiques qui nécessitent une adaptation plus poussée des paramètres de calcul.

#### *2.1.5.5 Données*

Plusieurs bases de données, toutes accessibles en tant que données ouvertes, sont employées afin de garantir la transparence et la reproductibilité des résultats. Ces informations sont issues de diverses sources publiques et de contributions communautaires sur OpenStreetMap.

#### *2.1.5.6 Résultats préliminaires*

Dans cette étude, on choisit de faire les calculs pour toutes les stations de la ligne orange du métro de Montréal.

Pour chaque station, on calcule les isochrones d'accès en 10 minutes à vélo, une première fois avec un paramètre de confort cyclable qui représente une personne à l'aise de partager la route avec les automobiles, et une seconde fois avec un paramètre de confort cyclable représentant une personne moins encline à quitter le réseau cyclable.

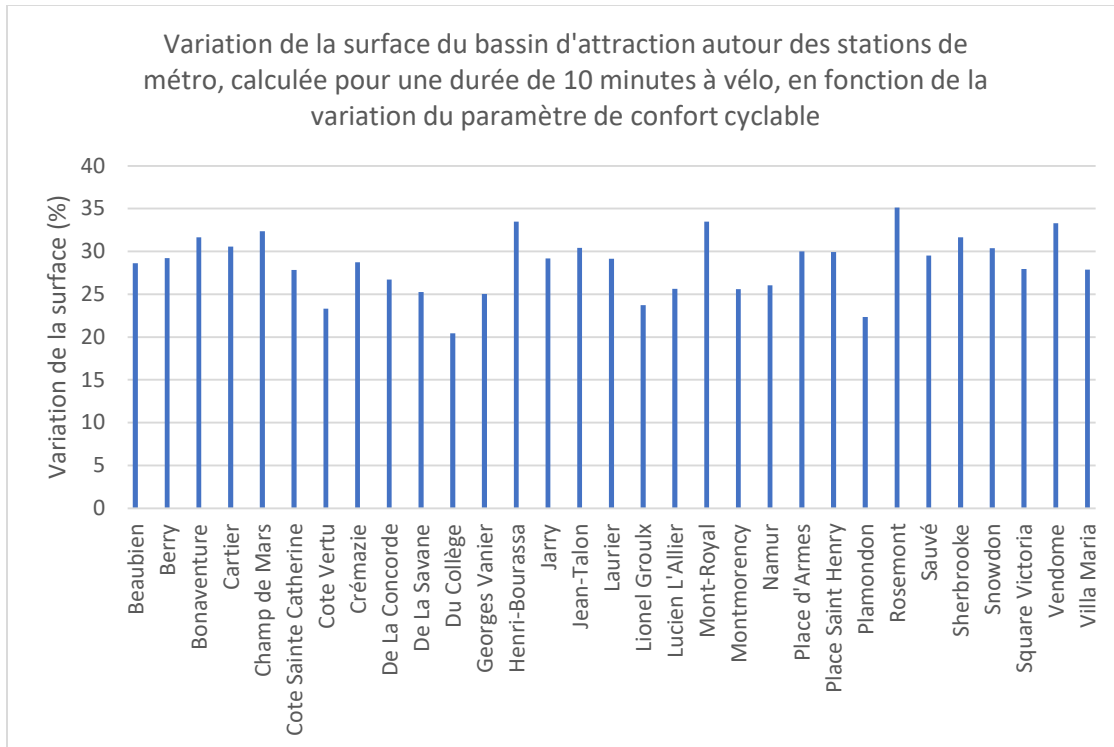


Figure 2-19. Variation de la surface de la surface accessible en 10 minutes à vélo autour des stations de la ligne orange, en fonction de la variation du confort cyclable

Les résultats obtenus avec cette méthode suggèrent une augmentation de surface variant de 20 à 35% de la surface des bassins d'accessibilité à vélo autour des différentes stations de métro, lorsqu'on améliore les conditions de circulation des cyclistes.

Cependant, on se rend compte que les résultats sont difficilement interprétables car on obtient dans certaines zones, comme le Plateau Mont Royal, une forte différence entre les bassins d'attraction calculés avec des paramètres de confort cyclable différents, ce qui suggère qu'une amélioration du réseau cyclable serait bénéfique. Pourtant ce quartier correspond à la partie de la ville avec le réseau cyclable le plus dense. Ainsi, même si on s'est efforcé de comprendre en profondeur le fonctionnement de l'algorithme de Valhalla, celui-ci ne permet pas d'obtenir des résultats cohérents dans le contexte recherché. Ainsi, une autre méthode apportant plus de flexibilité dans l'ensemble du calcul sera choisie pour la suite du projet.



## 2.1.6 Définir et mesurer la multimodalité de l'offre de transport

Par : Jana Abou Taam, maîtrise

Supervision : Pre Catherine Morency

Contexte : Chaire Mobilité / CRC Mobilité des personnes

Date de fin prévue : août 2024

### 2.1.6.1 Introduction

La recherche sur les transports a souvent été très sectorielle, s'intéressant à un mode à la fois. Au cours des vingt dernières années, toutefois, une vision plus globale s'est développée et plusieurs modes ont commencé à être incorporés dans les études (Nobis, 2007). Aujourd'hui, l'évaluation des transports multimodaux est un des sujets les plus importants dans la recherche sur les transports (Lemondé, Arsenio, & Henriques, 2021b). En effet, la multimodalité représente un des quatre axes de la recherche sur la variabilité des comportements de déplacements (Lemondé, Arsenio, & Henriques, 2021a). La définition la plus utilisée et la plus générale de la multimodalité est l'utilisation de différents modes de transport de manière flexible. C'est un concept qui peut décrire l'offre, la demande et les politiques de transport (Groth & Kuhnimhof, 2021). Il a été confirmé plusieurs fois dans la littérature que l'augmentation de la multimodalité est une stratégie efficace pour réduire les émissions de GES associées au secteur du transport (An, Heinen, & Watling, 2023). De plus, il a été montré que l'amélioration de l'offre de transport entraîne une hausse du niveau de multimodalité. On en déduit qu'on peut améliorer la durabilité des comportements des utilisateurs en améliorant la multimodalité de l'offre de transport (Deschaintres et al., 2021). Les bénéfices apportés par un système de transport plus multimodal ne se limitent pas à la diminution des émissions carbone. En effet, augmenter le taux de multimodalité permet l'émergence d'une communauté multimodale qui utilise moins la voiture et s'appuie sur les modes alternatifs, engendrant de nombreux bénéfices économiques et sociaux comme une diminution des accidents routiers, une augmentation du taux de personnes actives et en bonne santé et une réduction de la consommation d'énergie par habitant (Litman, 2001). Le système de transport lui-même est amélioré par la multimodalité qui permet d'augmenter la résilience (Amoaning-Yankson & Amekudzi-Kennedy, 2017), la praticité, la sécurité, la vitesse, le coût et la fiabilité des déplacements (Lemondé et al., 2021a). Ayant établi l'importance d'augmenter la multimodalité dans le système de transport, la nécessité d'un indicateur qui peut mesurer le niveau de multimodalité d'un système devient évidente. En effet, développer une mesure robuste de multimodalité est essentielle non-seulement dans les étapes de planification et prise de décision, mais aussi d'évaluation après la réalisation de projets (Lemondé et al., 2021a). Jusqu'à maintenant, un des principaux défis des départements de transport et des organisations de planification métropolitaine lors de l'évaluation des projets et la prise de décision réside dans l'absence de mesures de performance multimodales cohérentes et comparables dans le temps et à travers les régions (Khedri, Malarkey, & MacKenzie, 2022). Les indicateurs mesurés au niveau individuel ou régional permettent d'établir une image globale des préférences modales en tenant compte de l'offre et de l'accessibilité de cette offre. Ils permettent aussi de repérer les vulnérabilités dans le système (Lemondé et al., 2021a). Malgré le fait que l'importance du développement de systèmes de transports multimodaux soit de plus en plus apparente, une méthodologie formalisée de mesure de la multimodalité des systèmes dans un cadre exhaustif n'a toujours pas été établie (Ren et al., 2022).

#### 2.1.6.2 Objectif

Le but de ce projet est de formuler un indicateur de multimodalité de l'offre de transport qui prend en compte la disponibilité, l'accessibilité et la qualité de service de plusieurs modes, adapté au contexte montréalais.

Les modes considérés sont les suivants : l'automobile privée et partagée, le vélo privé et partagé, la marche et les transports en commun.

#### 2.1.6.3 Méthodologie globale

La méthodologie employée afin de réaliser cet objectif est la suivante :

- 1) Pour chaque mode, trouver dans la littérature des indicateurs établis qui mesurent la disponibilité, l'accessibilité et la qualité de service du mode.
- 2) Comparer les indicateurs identifiés avec les bases de données accessibles, puis sélectionner ceux qui peuvent être calculés.
- 3) Diviser le territoire étudié en plusieurs zones géographiques, puis calculer les indicateurs pour chaque mode dans chaque zone et les combiner.
- 4) Analyser les résultats obtenus et établir une classification des zones en fonction de leur multimodalité.

#### 2.1.6.4 Revue de littérature

Les mesures de multimodalité dans la littérature sont le plus souvent quantitatives, mais des mesures qualitatives existent aussi (Groth & Kuhnimhof, 2021). Cette revue de littérature se limitera aux mesures quantitatives, comme le but de ce projet est de développer une mesure quantitative de la multimodalité de l'offre de transport.

An et al. (2023) distinguent trois façons de mesurer la multimodalité qui ont été utilisées dans la littérature : (1) des caractérisations prédéfinies où les individus sont multimodaux ou unimodaux selon leurs modes de déplacement principaux, comme vu dans les travaux de Nobis (2007), (2) une classification basée sur les données en utilisant des méthodes non-supervisées de classification, comme vu dans les travaux de Heinen (2018) et (3) des indicateurs continus comme vu dans les travaux de Diana et Pirra (2016).

Développer une mesure de la multimodalité revient à développer une mesure de diversité et hétérogénéité, un problème traité dans plusieurs domaines (Diana & Pirra, 2016). Plusieurs façons de mesurer la multimodalité ont été proposées par des chercheurs. On peut distinguer deux volets d'études : un où la diversité du système correspond à la diversité de l'infrastructure (l'offre), et l'autre considère les comportements et perceptions des individus (la demande) (Ren et al., 2022).

##### 2.1.6.4.1 Indicateurs de multimodalité de l'offre

Litman (2001) revoit des indicateurs de performance liés à chaque mode, et deux indicateurs agrégés. Pour chaque mode, il présente des indicateurs de performance, qui pourraient être intégrés dans un indicateur de multimodalité. Un des indicateurs proposés pour mesurer la multimodalité du système est une mesure d'accessibilité : combien de points d'intérêts peuvent être atteints en un certain temps, avec combien de modes. L'autre indicateur est le « Transportation for Everyone Rating » qui présente dix critères concernant les modes disponibles, le service fourni et leur connectivité qui sont chacun notés sur 10, pour enfin donner une note sur 100 à une zone donnée. Un score supérieur à 70, indique une zone multimodale, non-dépendante de l'automobile.

La multimodalité de l'offre de transport est définie comme la diversité des options de modes disponibles (Groth & Kuhnimhof, 2021). C'est dans ce sens que le Complete Street Score est une mesure de la multimodalité de l'offre. Ce score part du principe qu'une route « complète » dessert tous les utilisateurs (les conducteurs, les piétons, les cyclistes, les utilisateurs de transport en commun) de façon adéquate, qu'ils utilisent cet espace pour se déplacer ou comme espace publique. Afin de déterminer le score, un auditeur répond à un questionnaire qui inclut des questions qui évaluent le service de la route par rapport à chaque groupe d'utilisateur, et compare ce score au score désiré qui change d'une communauté à l'autre (Kingsbury, Lowry, & Dixon, 2011). Ce concept est très utilisé dans les politiques de transport; en effet plus de 1700 politiques de « Complete Streets » ont été adoptées aux États-Unis ("National Complete Streets Coalition: Policy Atlas,").

En se basant sur les similarités entre le système écologique et le système de transport évoquées dans la revue de littérature d'Amoaning-Yankson & Amekudzi-Kennedy (2017), Rahimi-Golkhandan, Garvin, & Brown (2019) adaptent le concept de diversité écologique au système de transport. Ils proposent donc deux mesures de la diversité de l'infrastructure: la richesse et la régularité fonctionnelles. La richesse décrit la quantité totale de modes de transport disponibles dans une zone donnée, tandis que la régularité décrit la distribution de ces modes à travers la zone en termes d'accessibilité. Ces deux mesures combinées, avec la méthode de l'analyse par enveloppe des données (DEA), permettent de déterminer la diversité des infrastructures dans un système de transport. Cette mesure prend donc en compte la disponibilité des différents modes et l'accessibilité de ces modes aux individus à travers la zone considérée.

#### *2.1.6.4.2 Indicateurs de multimodalité de l'offre et de la demande*

Deux études présentent un indicateur de multimodalité qui prend en compte l'offre et la demande. Lee et Miller (2017) ont développé un indicateur qui a pour but de mesurer la multimodalité de l'offre et de la demande des projets de transport. Cet indicateur est basé sur l'indice de Simpson qui permet de mesurer la diversité d'un milieu. L'indicateur développé par les auteurs, qui est appelé Degrés de Multimodalité (Degree of Multimodality, DM), adapte les idées formulées par Simpson (1949), en considérant non-seulement le nombre de modes pris en compte par le projet mais aussi leur utilisation. Cet indicateur prend donc en compte l'offre et la demande. Afin de mesurer la multimodalité de l'offre, les coûts marginaux ou totaux (qui peuvent inclure ou non les coûts d'entretien selon les données disponibles) consacrés à chaque mode dans le projet sont comparés au coût total du projet. Pour la demande, ce sont les parts modales qui sont considérées. Celles-ci peuvent provenir de plusieurs sources de données. Le poids de chacun des deux éléments est déterminé grâce à la méthode de l'analyse en composantes principales (PCA). Les auteurs l'ont appliqué sur six projets (trois autoroutes, et trois projets de centres multimodaux) et ont mesuré la multimodalité avant et après les projets. Les sources de données utilisées dans ce cas pour les parts modales étaient des comptages, une enquête sur les préférences, le recensement américain (American Community Survey) qui communique des informations sur les modes utilisés pour les déplacements maison-travail, et les prévisions des volumes de circulation ou des déplacements par mode.

Ren et al. (2022) proposent un cadre d'étude qui permet de quantifier la diversité des systèmes de transports multimodaux basée sur l'entropie qui prend en compte l'infrastructure présente et les comportements de déplacement des usagers. Les auteurs mesurent séparément la multimodalité de l'offre et de la demande. Ils comparent ensuite la classification de différentes sous-régions en termes d'offre et de demande, comme les valeurs obtenues ne sont pas obtenues de la même façon et ne sont donc pas comparables. La mesure de la diversité de l'offre reprend

les concepts de richesse et régularité fonctionnelle proposée par Rahimi-Golkhandan et al. (2019) et les combine avec ces deux éléments calculés pour chaque mode considéré avec la méthode de pondération entropique (en anglais Entropy Weight Method, abrégé EWM), pour obtenir un indicateur qui représente la multimodalité de l'offre.

La mesure de la multimodalité de la demande dans une zone se fait en mesurant la répartition de l'utilisation des différents modes de transport par les résidents d'une zone. Cela se fait en calculant l'entropie associée à la répartition d'utilisation des modes dans chaque zone. Le nombre de déplacement effectués par mode est utilisé comme mesure d'intensité de l'utilisation.

#### *2.1.6.5 Données*

Les bases de données utilisées pour ce projet sont nombreuses. Pour chaque mode de transport au moins une base de données est nécessaire pour évaluer chacun des trois aspects considérés. Elles sont disponibles en tant que données ouvertes, ou fournies par les opérateurs des modes après demande.

Les données couvrent la période de l'automne 2018, s'étendant de septembre à décembre, afin d'assurer une comparabilité des résultats tout en les rendant exploitables dans le contexte de l'enquête Origine-Destination montréalaise menée durant la même période. Pour cette même raison, seuls les jours de semaines sont considérés pour toutes les analyses. Pour les bases de données non disponibles pour cette période, nous avons sélectionné la période la plus proche ou la plus comparable. Initialement, le projet portait sur l'ensemble de la région montréalaise couverte par l'enquête Origine-Destination, mais en raison du manque de données fiables pour certains modes, la zone d'étude a été restreinte aux territoires de Montréal et de Laval.

#### *2.1.6.6 Divisions du territoire*

L'objet d'étude de ce projet est la zone, le choix de la division du territoire est donc très important. Le problème d'agrégation spatiale (Modifiable Areal Unit Problem ou MAUP en anglais), constitue une source de biais statistique susceptible d'influencer considérablement les résultats et les conclusions obtenus. Dans le but d'éviter ce biais et de déterminer la division géographique la plus pertinente pour l'étude de la multimodalité, six divisions géographiques ont été examinées. Si la distribution des résultats demeure similaire lorsque la taille ou la forme des divisions est modifiée, cela indique que l'indicateur est stable. Les six divisions prises en considération sont inspirées des travaux de Nix (2008), qui ont testé l'effet d'échelle du MAUP en comparant les résultats d'un modèle pour différentes divisions du recensement, et ont évalué l'effet zonal en comparant deux divisions ayant le même nombre de zones mais des limites différentes. Les divisions utilisées comprennent les aires de diffusion et les secteurs du recensement, les secteurs municipaux de l'enquête Origine-Destination, ainsi que trois grilles contenant le même nombre de carrés que chacune des divisions précédemment citées. Les divisions utilisées peuvent être vues ci-dessous :

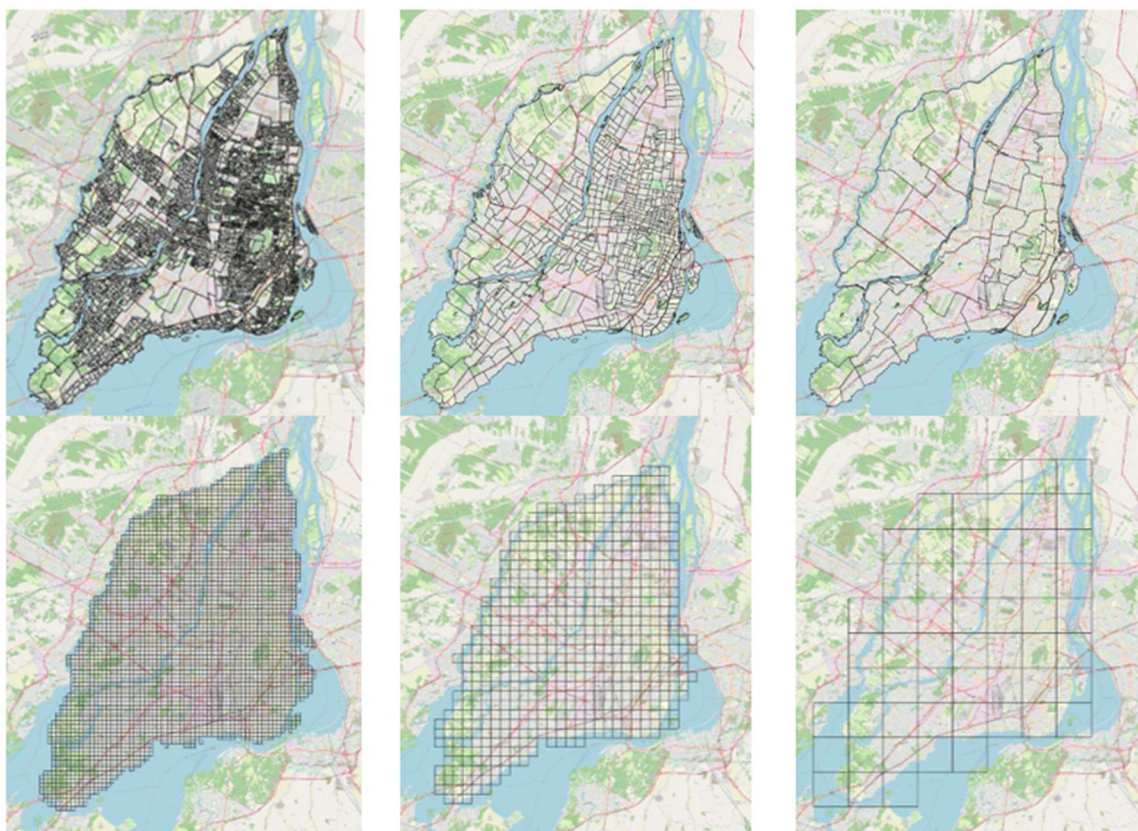


Figure 2-20. Cartes montrant les divisions du territoire (de gauche à droite: les aires de diffusion et la grille équivalente, les secteurs du recensement et la grille équivalente, les secteurs municipaux et la grille équivalente)

#### 2.1.6.7 Évaluation de la disponibilité des modes

La mesure de disponibilité des modes dans les zones utilisées dans le cadre de cette maîtrise est celle de la richesse développée par Rahimi-Golkhandan et al. (2019), qui la décrivent comme une mesure de la « quantité de modes de transports offerts dans une zone » ou de la « disponibilité modale ». Il se base sur plusieurs études pour déterminer des mesures pour le réseau routier, les bus, le transport ferroviaire, les pistes cyclables et les chemins piétonniers. Le but de cette mesure est de quantifier la présence des infrastructures nécessaires à l'utilisation des modes dans chaque zone.

En se basant sur le constat de Xie et al. (2009) qui indique que plus un réseau est dense, plus il est développé, la mesure de la richesse des réseaux routier, cyclable et piéton est leur densité. C'est une mesure qui a souvent été utilisée dans la littérature pour ces réseaux.

Pour tous les systèmes de transport en commun (bus, métro et train), la mesure est inspirée de celle de Derrible et Kennedy (2010). Elle prend en compte les deux éléments principaux d'un réseau de transport en commun : les lignes et les stations, qui représentent la « quantité » de transport en commun offert. Le nombre de stations et lignes est ensuite divisé par le nombre total de stations et lignes dans le réseau considéré, ainsi que par l'aire de la zone considérée, par souci d'uniformité avec les mesures de disponibilité d'autres modes.



#### 2.1.6.8 Évaluation de l'accessibilité des modes

Les mesures d'accessibilité utilisées dans le cadre de ce projet sont celles développées dans le même article de Rahimi-Golkhandan et al. (2019), sur la caractérisation et mesure de la diversité des infrastructures de transports, mentionné dans la partie précédente.

La formule de la mesure proposée est la suivante :

$$Acc = \frac{\sigma_d}{\sqrt{A}}$$

Où Acc : la mesure d'accessibilité

$\sigma_d$  : l'écart-type des distances les plus courtes des sous-divisions à un mode de transport

A : l'aire de la zone considérée

Pour calculer cet indicateur, des sous-divisions de chaque zone doivent être déterminées. Ensuite, la distance de chaque sous-division à l'infrastructure la plus proche, associée au mode de transport considéré, est calculée. Puis l'écart-type de ces distances est calculé.

Le principe de l'indicateur est de mesurer si l'infrastructure offerte pour le mode est répartie uniformément dans la zone, résultant en un accès égal au mode, ou si elle est concentrée dans une partie de la zone. Les auteurs ont préféré cette mesure à d'autres mesures d'accessibilité classiquement utilisées car elle est applicable à tous les modes, comparativement à des mesures qui se basent sur la distance de marche nécessaire pour atteindre une station.

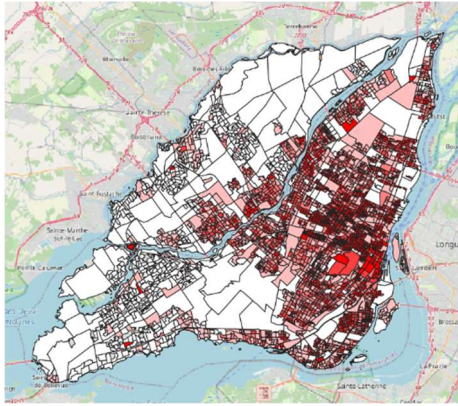
#### 2.1.6.9 Évaluation de la qualité de service des modes

La mesure de qualité de service est celle qui varie le plus d'un mode à l'autre. Celle utilisée pour l'automobile privée et partagée est une mesure de la qualité du réseau routier, évaluée à travers la mesure de la congestion. Pour le vélo (privé et partagé), la qualité des pistes cyclables est évaluée selon le système de classification du confort et de la sécurité des voies cyclables canadiennes (Can-BICS) (Winters et al., 2020). Pour le transport en commun, une combinaison de la disponibilité temporelle et de la fiabilité est considérée, selon le Transit Capacity and Quality of Service Manual (Transportation Research Board National Academies of Sciences, 2013). Pour la marche, le Walkability Index est utilisé (Frank et al., 2010).

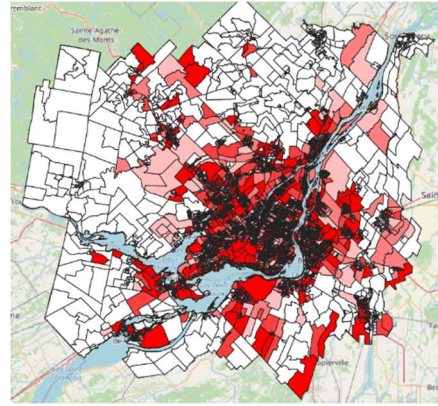
#### 2.1.6.10 Résultats préliminaires – premiers calculs

La comparaison des distributions des indicateurs calculés pour tous les modes pointe vers la même conclusion en termes de stabilité face à l'échelle et au zonage des découpages. En ce qui concerne l'aspect de l'échelle, la stabilité est observée en comparant les secteurs de recensement et les secteurs municipaux, mais elle est encore plus marquée en comparant les grilles équivalentes à ces deux niveaux. Les distributions ont beaucoup changé pour les aires de diffusion et les grilles d'aires de diffusion. En ce qui concerne l'aspect de la zone, les différences deviennent de moins en moins significatives lorsque la taille moyenne des zones augmente. On observe le plus de différences entre l'aire de diffusion et sa grille équivalente, et le moins de différences entre les secteurs municipaux et la grille équivalente.

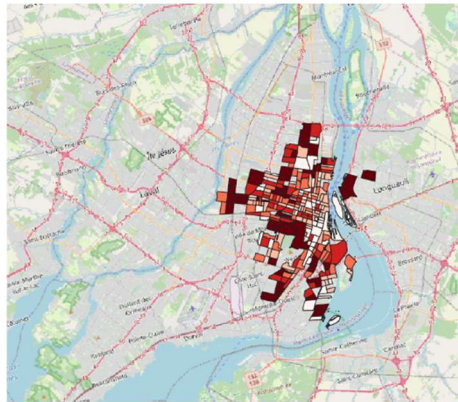
Les indicateurs calculés pour chaque mode peuvent être visualisés ci-dessous. Ces calculs ont été effectués avant que la zone d'étude ne soit limitée à Montréal et Laval. Chaque indicateur pour un mode donné varie de 0 à 1, où 0 représente la « pire » offre de transport de ce mode et 1 la « meilleure » offre de transport de ce mode. Les zones où le mode de transport n'existe pas ne sont pas prises en compte dans l'analyse ni sur les cartes ci-dessous.



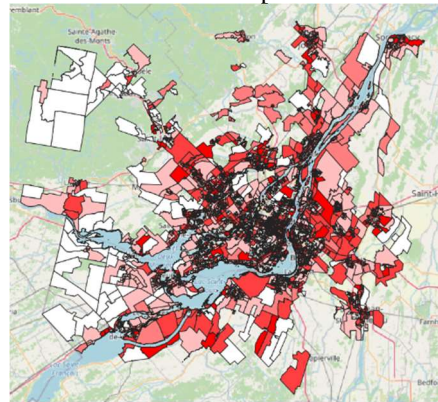
Marche



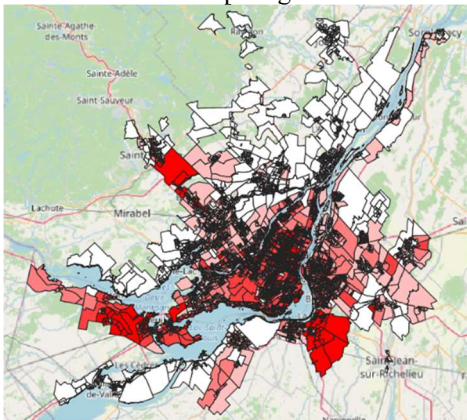
Automobile privée



Vélopartage



Vélo privé



Transport en commun

Figure 2-21. Carte montrant la variation de l'indicateur de disponibilité, accessibilité et qualité de service pour différents modes



## 2.1.7 Méthodologie d'extraction, de fusion et d'enrichissement de données spatio-temporelles dans le domaine des transports

Par : Alexandre Brunet, maîtrise

Supervision : Pre Catherine Morency

Contexte : Chaire Mobilité / Transition

Date de fin prévue : août 2025

### 2.1.7.1 Introduction

L'analyse de la mobilité et des transports a évolué vers un domaine centré sur l'exploitation des données afin de mieux comprendre les comportements de mobilité et les systèmes de transport. Actuellement, la plupart des systèmes sont informatisés, ce qui facilite la production et la collecte de données sur leur utilisation. À titre d'exemple, à Montréal, des systèmes comme la carte Opus enregistrent les entrées dans le métro et les bus. Par ailleurs, d'autres systèmes reposent sur des applications mobiles pour générer des données, comme BIXI, qui collecte des informations telles que la station de départ, la durée et la destination du trajet.

Cependant, les données produites de manière « intelligente » ou automatisée ne constituent pas la seule source pertinente en matière de transport et de mobilité. Les enquêtes, telles que l'enquête Origine-Destination, capturent les comportements de déplacement d'un échantillon de population. En outre, les données ouvertes telles que le *General Transit Feed Specification* (GTFS), les données d'*OpenStreetMap* (OSM), les données sur l'utilisation du sol, le rôle foncier et les données de recensement enrichissent également les analyses de mobilité et de transport.

Toutes ces sources de données ont le potentiel d'enrichir les analyses, mais elles peuvent également représenter un défi significatif pour les analystes. Dans un environnement où la diversité des sources de données et leur volume sont en constante croissance, et où la manipulation des données est devenue monnaie courante, plusieurs questions essentielles se posent :

- Comment pouvons-nous améliorer et simplifier l'analyse des données relatives aux transports et à la mobilité ?
- Comment pouvons-nous fusionner plusieurs ensembles de données pour améliorer les analyses et quelles sont les techniques de fusion couramment utilisées ?
- Quels sont les cas types de fusions de données couramment rencontrés dans l'analyse des transports et de la mobilité, ainsi que les concepts et les notions clés utilisés dans ces analyses ?

### 2.1.7.2 Objectifs

L'objectif de ce mémoire de maîtrise est de répondre à certains concepts mentionnés précédemment. Dans un premier temps, nous nous concentrerons à mieux comprendre divers éléments clés utilisés dans l'analyse des transports, notamment les notions d'objets, de zones d'analyses, de typologies, ainsi que des indicateurs et des métriques pertinentes.

Ensuite, une analyse approfondie des types de données et des sources disponibles sera indispensable pour appréhender de manière plus précise les éléments pertinents pour conduire des analyses de mobilité et de transport. Parallèlement, nous documenterons des cas types afin de dresser un panorama des analyses précédentes, permettant ainsi une meilleure compréhension des données utilisées et de leurs objectifs. De plus, nous examinerons les

méthodes de fusion de données afin de comprendre les normes utilisées dans le domaine en vue de combiner plusieurs ensembles de données.

Enfin, nous présenterons un outil *open source*, généralisable et modulable, conçu pour simplifier les analyses et minimiser la complexité ainsi que la redondance des manipulations lors de l'extraction, de la fusion et de l'enrichissement des données spatio-temporelles en transport.

#### 2.1.7.3 *Méthodologie envisagée*

Pour relever ces défis et répondre à ces questions, nous développerons une méthodologie centrée principalement sur la fusion de données spatio-temporelles. Cette approche exploitera les notions clés discutées précédemment et utilisera un outil développé spécifiquement pour orchestrer la fusion de différentes sources de données, simplifiant ainsi certaines analyses.

#### Fusion de données

La fusion de données est un processus qui recourt à diverses méthodes pour combiner plusieurs sources de données, souvent hétérogènes, afin de produire une information améliorée.

#### Objectifs de la fusion

Voici quelques exemples où la fusion d'ensembles de données est utile pour améliorer l'information.

#### **Corrections de données :**

La fusion de données peut être utilisée pour corriger des données. Par exemple, si une source de données présente des incohérences, des imperfections, ou des disparités, la fusion peut permettre de rectifier ces problèmes.

#### **Améliorer la fiabilité des données :**

La fusion peut être utilisée pour augmenter la qualité des données et améliorer leur fiabilité.

#### **Améliorer l'information :**

La fusion de deux ensembles de données peut aider à obtenir une meilleure information une fois les ensembles de données joints. En effet, une source de données pourrait manquer d'informations ou de détails, et pourrait bénéficier de la fusion avec une autre source afin de fournir des informations avec un meilleur niveau de précision.

#### **Améliorer la complétude des données :**

Dans ce cas, la fusion est utile afin d'obtenir une source de données complète. Lorsque la source de données initiale ou individuelle est insuffisante pour fournir assez d'informations sur les résultats souhaités, la fusion peut combler ces lacunes.

#### 2.1.7.4 *Classifications de la fusion*

Ces dernières années, le domaine de la fusion de données a connu d'importantes avancées. Comme évoqué précédemment, avec la quantité croissante de données produites et stockées, il est crucial de disposer de méthodes efficaces pour exploiter pleinement la valeur de ces ensembles de données. Selon le type d'entrées et de sorties, il existe différentes classifications de méthodes de fusion. Une classification largement reconnue a été proposée par Dasarathy (1997). La Figure 2-22 illustre cette classification en fonction des entrées et des sorties.

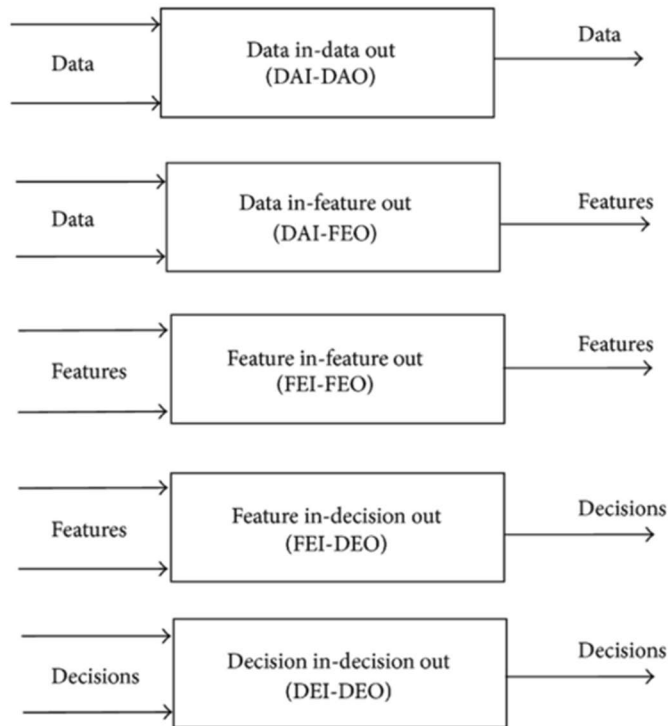


Figure 2-22. Classification de Dasarathy

En se basant sur la classification de Dasarathy (1997), voici une brève description des différentes classifications de fusion :

- « *Data in Data out* » : Cette classification de fusion vise à améliorer la fiabilité des données en sortie. Les données d'entrée et de sortie sont donc brutes.
- « *Data in Feature Out* » : La fusion est utilisée pour extraire une caractéristique précise qui facilite la prise de décision. Les données d'entrée sont brutes, tandis que les sorties sont des caractéristiques.
- « *Feature in Feature Out* » : Cette classification permet d'extraire de nouvelles caractéristiques. Les données d'entrée sont des caractéristiques provenant de différentes sources, tandis que les sorties sont de nouvelles caractéristiques.
- « *Feature in Decision Out* » : Certaines caractéristiques sont fusionnées pour prendre des décisions. Les données d'entrée sont des caractéristiques, tandis que les sorties sont des données permettant de prendre des décisions.
- « *Decision in Decision Out* » : La fusion combine différentes sources de décision pour obtenir une décision finale.

#### 2.1.7.5 Méthode de fusion

Selon le type de fusion et le résultat souhaité, différentes méthodes d'association sont disponibles. La section suivante présente quelques-unes de ces méthodes, extraites de la littérature sur la fusion et utilisées dans le domaine du transport et de la mobilité (Castanedo, 2013):

- Méthode par associations : Cette approche fusionne plusieurs ensembles de données en se basant sur leurs similarités. Des techniques telles que les plus proches voisins ou l'association probabiliste des données sont couramment utilisées.
- Méthode par classifications : Cette méthode classe les objets en différentes catégories en fonction de leurs caractéristiques. Des algorithmes tels que les forêts aléatoires peuvent être employés dans ce contexte.
- Méthode par inférence statistique : Cette approche fusionne deux ensembles de données en utilisant des méthodes d'analyse statistique, en se basant sur des hypothèses communes par exemple.

Il existe d'autres méthodes et techniques de fusion. Notre objectif sera de déterminer les plus pertinentes dans le contexte de l'analyse de la mobilité et du transport en identifiant, comme mentionné précédemment, les cas types de fusion dans ce domaine d'étude.

#### *2.1.7.6 Portée de la recherche*

L'objectif de ce mémoire est de présenter un aperçu des méthodes de fusion utilisées dans l'analyse des transports et de la mobilité, ainsi que des objets, des sources de données et des concepts couramment utilisés.

Une méthodologie d'extraction, de fusion et d'enrichissement des données sera proposée, appuyée par un outil développé à l'aide d'un langage de programmation et de certains logiciels. Cet outil vise à faciliter l'analyse des données spatio-temporelles dans le domaine du transport. Il sera composé de différents modules élaborés au fur et à mesure du projet et devra être suffisamment flexible pour gérer différents scénarios d'analyse.

La fusion de données est utilisée pour créer de nouveaux ensembles de données afin d'améliorer les analyses. Par exemple, une fois la fusion effectuée, l'utilisateur pourra observer comment les hypothèses, les distributions et les indicateurs de son analyse fluctuent, et déterminer si les résultats sont meilleurs ou moins bons après la fusion.

Prenons l'exemple où nous souhaitons analyser un objet, comme un point, et les attributs autour de ce point. Souvent, il est nécessaire d'ajouter une autre source de données aux données initiales contenant l'objet afin de compléter les informations autour de ce point. Par exemple, si nous voulons comprendre l'interaction entre différents modes de transport, chaque mode de transport possède généralement ses propres données, stockées dans des sources distinctes.

Ainsi, l'outil permettrait à l'analyste de fusionner des ensembles de données pour enrichir l'information sur cet objet et explorer différentes variations autour de ce point pour observer divers résultats. Il s'agit d'un exemple courant de fusion de données qui peut être assez simple, mais qui devient coûteux en termes de temps si elle doit être répétée plusieurs fois. De plus, comme mentionné précédemment, l'outil sera open source, ce qui permettra un développement continu au fil du temps.

## 2.1.8 Impact de l'intégration de composantes urbaines dynamiques sur les mesures d'accessibilité

Par : Tristan Dupont, maîtrise  
Supervision : Pre Catherine Morency  
Contexte : Chaire Mobilité  
Date de fin prévue : août 2024

### 2.1.8.1 Introduction

La première définition connue de l'accessibilité est « le potentiel d'interactions avec des opportunités pour un individu » (Hansen, 1959). Au fil du temps, les définitions se sont multipliées et l'accessibilité est généralement définie comme l'interaction de 3 composantes urbaines : la population, les opportunités et les réseaux de transport. Par exemple, l'accessibilité est « la facilité avec laquelle on accède à une activité à partir d'un lieu et d'un mode de transport » (Dalvi et Martin 1976), ou encore elle est « la capacité à atteindre des biens, services, activités et destinations à un coût raisonnable, dans un temps donné et moyennant un effort acceptable » (Caulfield et al., 2014).

En tant qu'indicateurs intégrant ces 3 composantes urbaines (population, opportunités et réseaux de transport), les mesures d'accessibilité sont appliquées dans des contextes divers. L'accessibilité peut être utilisée par les planificateurs, les ingénieurs ou les responsables politiques pour analyser l'efficacité des réseaux de transport (Benenson et al., 2011), analyser les stratégies d'utilisation du sol (Vandenbulcke et al., 2009) ou encore mesurer l'équité spatiale et sociale (Dai et Wang, 2011).

Cependant, les mesures évoluent et se complexifient (Geurs et al., 2012) et tentent de répondre à différentes problématiques. Les tendances actuelles sont à l'étude de l'accessibilité dynamique par l'intégration des dynamiques de ses composantes : la population, les opportunités et les réseaux de transport. Négliger ces dynamiques peut induire en erreur les mesures d'accessibilité (Neutens et al., 2012).

En effet, ces 3 composantes urbaines (population, opportunités, réseaux de transport) sont dynamiques et varient dans le temps. La population est dynamique : elle se déplace au cours de la journée (voir Figure 2-23).

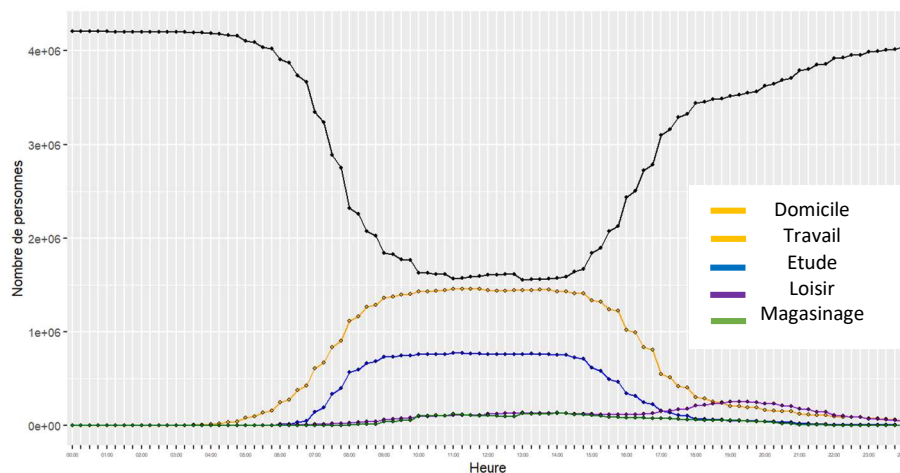


Figure 2-23. Profil d'accumulation de personnes à travers un jour moyen de semaine (Source : OD 2018)

L'accessibilité d'une population à des opportunités ne se mesure pas uniquement depuis les lieux de domicile (comme le font encore la majorité des études). Les opportunités aussi sont dynamiques : la disponibilité des commerces ou des services n'est pas la même à toutes les heures de la journée. Voici par exemple l'évolution de la superficie totale de commerces alimentaires ouverts sur l'île de Montréal entre 7h et 22h (voir Figure 2-24).

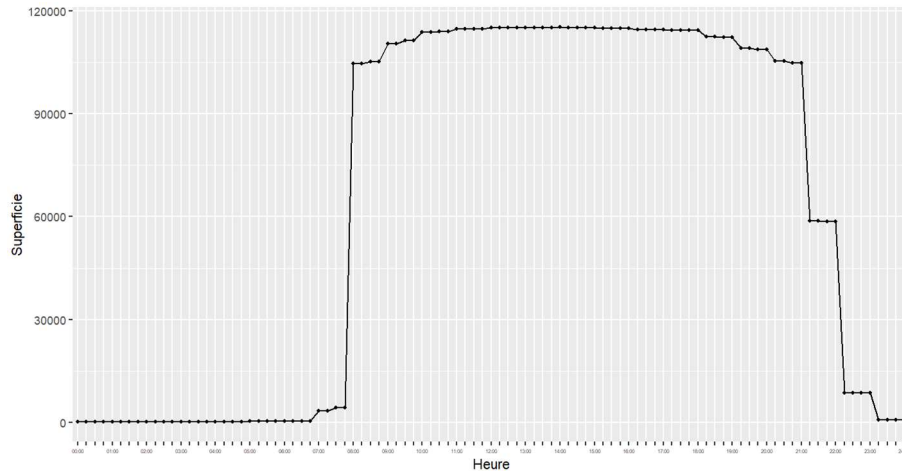


Figure 2-24. Superficie totale des supermarchés ouverts sur l'île de Montréal (Source: Open Street Map)

Et enfin, les réseaux de transport évoluent également au cours d'une journée : les liens entre la population et les opportunités sont dynamiques. Par exemple, l'évolution du niveau service du transport collectif sur l'île de Montréal est représenté ici (voir Figure 2-25).

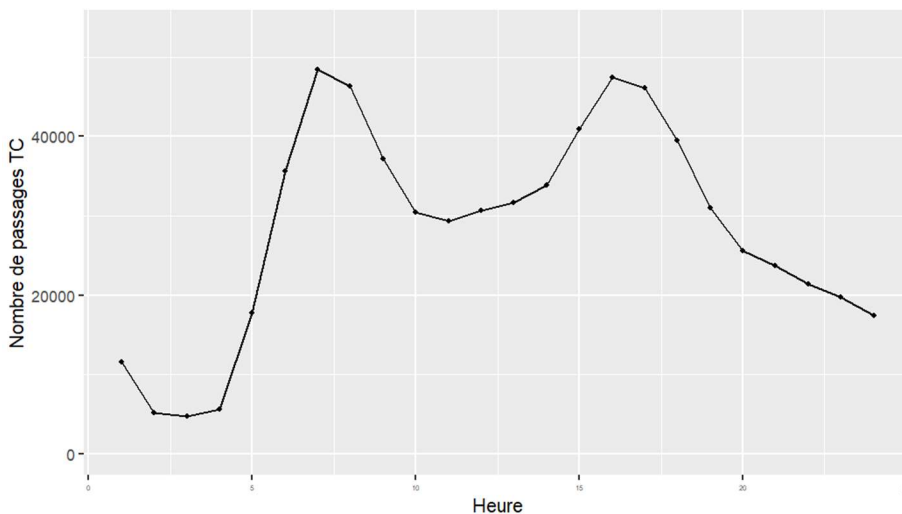


Figure 2-25. Nombres de passages de transport collectif de la STM par heure un jour de semaine (Source: GTFS 11/2023)

La fréquence de passage des transports collectifs évolue au cours d'une journée, mais aussi parfois les tracés et les arrêts desservis.

De nombreuses études intègrent ces dynamiques urbaines mais de façons inégales : les dynamiques des transports sont souvent considérés alors que les mouvements de population sont plus rarement étudiés. De plus, les mesures d'accessibilité sont nombreuses et l'impact des considérations dynamiques sur celles-ci n'est pas connu.

Cette recherche propose d'étudier méthodologiquement l'impact de l'intégration des dynamiques urbaines sur différentes mesures d'accessibilité.

### 2.1.8.2 Objectifs

Les objectifs de cette recherche sont les suivants :

- Étudier l'impact de la dynamisation de la population, des transports et des opportunités, sur 3 mesures d'accessibilité
  - Comment se comporte une mesure d'accessibilité en dynamisant ses paramètres?
  - Certaines mesures surestiment l'accessibilité, comment évoluent ces différences entre mesures dans différents « contextes dynamiques » ?
- Étudier l'impact de la dynamisation de la population, des transports et des opportunités sur les mesures d'équité basées sur ces mesures d'accessibilité

### 2.1.8.3 Méthodologie générale

Pour étudier ces mesures d'accessibilité temporelles, un contexte d'étude a été défini au préalable. Ce contexte d'étude est le suivant : Étude de l'accessibilité aux services alimentaires en transports collectifs, sur l'île de Montréal, au cours d'une journée de semaine (de 7:00 à 22:00).

Cette étude est menée avec 3 mesures d'accessibilité, et l'accessibilité est considérée proportionnelle à la superficie des commerces accessibles. Les 3 mesures sont choisies par leur popularité dans la littérature et par leur nature : une mesure est obtenue en ajoutant/supprimant un paramètre d'une autre mesure.

La première mesure d'accessibilité est la mesure d'opportunités cumulées :

$$A_{OC}(i) = \sum_j (S_j)_{t_{ij} < \delta}$$

Pour un point i, elle mesure la surface totale de commerces j accessibles sous le seuil de temps  $\delta$ . Le seuil temporel est testé égal à 15, 20 et 25 minutes pour contrôler l'influence de ce paramètre sur les résultats.

La deuxième mesure d'accessibilité est la mesure gravitaire :

$$A_G(i) = \sum_j \left( \frac{S_j}{f(t_{ij})} \right)_{t_{ij} < \delta}$$

Pour un point i, elle mesure la surface totale de commerces j accessibles sous le seuil de temps  $\delta$ , pondérée par une fonction de friction du temps de trajet entre le logement et les commerces. Différentes fonctions de friction sont testées pour contrôler l'impact de ce paramètre (fonction inverse, fonction gaussienne, fonction sigmoïde).

La dernière mesure d'accessibilité est la mesure par zone de captage flottante en deux étapes (2SFCA) :

$$A_{2SFC}(i) = \sum_j \left( \frac{S_j}{f(t_{ij})V_j} \right)_{t_{ij} < \delta}$$

Pour un point i, elle mesure la surface totale de commerces j accessibles sous le seuil de temps  $\delta$ , pondérée par une fonction coût du temps de trajet entre le point i et les commerces j, et pondérée par la concurrence  $V_j$  à ces commerces. La concurrence  $V_j$  est calculée de la façon suivante :



$$V_j = \sum_k \left( \frac{P_k}{f(t_{kj})} \right)^{t_{kj} < \delta}$$

La concurrence est une fonction du nombre de personnes  $P_k$  et de la fonction coût du temps de trajet entre les personnes et le commerce. Selon le cadre statique-dynamique,  $P_k$  représente la population de nuit ou la population de jour.

Ces mesures d'accessibilité sont effectuées en implémentant au fur et à mesure les dynamiques des 3 composantes urbaines. Ainsi, 4 cadres d'étude « Statique-Dynamique » sont définis.

Tableau 2-13. Cadres d'étude statique-dynamique

Cadre d'étude	Population	Opportunités	Transport
<i>Statique</i>	Statique	Statique	Statique
<i>Statique-Dynamique 1</i>	Statique	Statique	Dynamique
<i>Statique-Dynamique 2</i>	Statique	Dynamique	Dynamique
<i>Dynamique</i>	Dynamique	Dynamique	Dynamique

Ainsi, chaque mesure d'accessibilité est calculée dans chaque cadre d'étude statique-dynamique. Cela permet de comparer la sensibilité des différentes mesures à l'ajout de paramètres dynamiques et de comparer les différentes mesures dans différents cadres statique-dynamique.

#### 2.1.8.4 Données

##### Origine des calculs d'accessibilité

Pour toutes les mesures et pour tous les cadres statiques-dynamiques, les calculs d'accessibilités ont été effectués depuis 961 logements de la liste des unités d'évaluation foncière, répartis sur l'île de Montréal. Ces 961 points découpent l'île de Montréal en 961 zones, à l'aide d'un diagramme de Voronoï.

Ces zones sont représentées à la Figure 2-26. Les zones sont plus « fines » dans les zones les plus denses en opportunités et en population pour plus de précision.

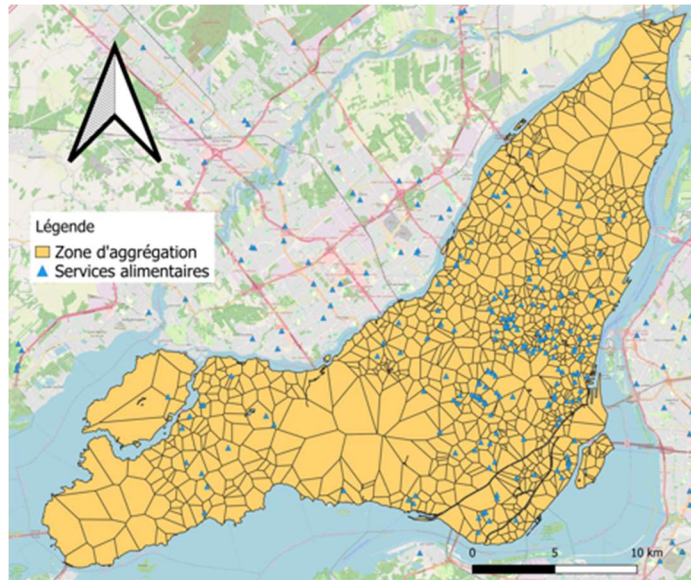


Figure 2-26. Découpage de l'île de Montréal

### Population

En statique, chaque personne est considérée à son domicile selon les données du recensement. L'accessibilité d'une personne lui est attribuée selon la zone d'agrégation dans laquelle elle se trouve.

En dynamique, les positions des personnes sont issues de l'enquête OD 2018. L'accessibilité d'une personne lui est attribuée selon la zone d'agrégation dans laquelle elle se trouve à chaque instant t.

### Opportunités

Les services alimentaires sont issus d'OpenStreetMap. L'extraction donnant une majorité de points, la plupart des superficies sont inconnues. Ainsi les commerces sont classés en 4 catégories, pour lesquelles une valeur de superficie unique est attribuée découlant d'une analyse des échantillons de polygones de chaque catégorie.

Tableau 2-14. Table des catégories de commerces

Catégorie 1	"shop"="deli"
Catégorie 2	"shop"="greengrocer" & "shop"="farm"
Catégorie 3	"shop"="supermarket" \ {Catégorie 4}
Catégorie 4	"shop"="supermarket" & "name" = "IGA"   "L'Intermarché"   "Maxi"   "Metro"   "Provigo"   "PA"   "Super C"   "Walmart"

En statique, les commerces sont considérés comme étant toujours ouverts.

En dynamique, les heures d'ouvertures sont considérées. Ces heures sont extraites d'OpenStreetMap et sont enrichies manuellement à partir de données en ligne lorsque cela est nécessaire.

## Transport

Les réseaux de transport de la STM, STL et RTL du mois de novembre 2018 sont considérés à partir des données GTFS.

En statique, les temps de trajet sont calculés en heure de pointe du matin (8 :30).

En dynamique, les temps de trajet sont calculés toutes les 15 minutes entre 7 :00 et 22 :00.

Tous les temps de trajet sont calculés avec la plateforme Transition, développée par la Chaire Mobilité de Polytechnique Montréal.

Le Tableau 2-15 propose un récapitulatif des données.

Tableau 2-15. Récapitulatif des données

	Sous-composantes	Données		Hypothèses
		Statique	Dynamique	
Population	Origines des calculs d'accessibilité	961 logements de la liste des unités d'évaluation foncière		Chaque personne se trouve au point logement le plus proche
	Personnes	Recensement	Enquête OD	
Opportunités	Coordonnées des commerces	354 « shop » OSM de type alimentaire		L'accessibilité est proportionnelle à la superficie des opportunités
	Superficie	Données OSM		
	Horaires d'ouvertures	Toujours ouvert	Données OSM et consolidation manuelle	
Transport	Horaires	Données GTFS: STM, STL, RTL		X
	Temps de trajet	Transition Heure de pointe	Transition Toutes les 15 minutes	

## 2.1.9 Modélisation des facteurs ayant une incidence sur la qualité des trajets en transport en commun

Par : Alicia Brodeur, maîtrise

Supervision : Pre Catherine Morency

Contexte : Chaire Mobilité

Date de fin prévue : avril 2025

### 2.1.9.1 Introduction

Dans une ère où les changements climatiques représentent une réelle problématique, se diriger vers une mobilité plus durable représente une solution vers laquelle les efforts devraient être mis. En effet, avec la place que prend l'automobile dans la mobilité quotidienne, l'augmentation de la part modale du transport en commun (TC) est un vrai défi. Les réseaux de transport en commun sont généralement conçus pour répondre à la demande des déplacements domicile-travail durant les heures de pointe. Cependant, afin de rendre le TC compétitif face à l'automobile, l'offre de TC doit répondre aux besoins de mobilité d'une population diversifiée, se déplaçant pour différents motifs de déplacement et à toutes les heures de la journée. Afin d'offrir un réseau de transport de qualité, il est important de comprendre le contexte et les contraintes reliés à ce mode de transport. Le projet de maîtrise sera focussé sur la modélisation des facteurs qui ont un impact sur le choix d'un trajet en TC. Le projet permettra de connaître l'état des connaissances sur les facteurs qui pénalisent différentes composantes des trajets en TC. Ces facteurs qui sont directement liés à la qualité des trajets offerts, pourront ensuite servir dans la modélisation de trajets qui seront adaptés à chaque type d'utilisateur. Ce projet s'inscrit en continuité des travaux de Frappier (2015) et Poirier (2021).

### 2.1.9.2 Recherche bibliographique

Il faut premièrement établir les différents facteurs qui entrent en compte lors de la prise de décision des usagers face au choix d'un mode et d'un trajet. En effet, le processus de décision inclut la charge mentale, psychologique et physique des usagers. Une hypothèse est que le temps de parcours n'est pas la seule variable qui est importante. Effectivement, une panoplie d'autres facteurs pèsent dans la balance. Ces facteurs font donc varier la qualité des options disponibles. Le projet est effectué dans la perspective de pouvoir mettre les variables dans une grande équation de coût généralisé afin d'obtenir le temps perçu pour chaque trajet. Le temps perçu pourra être comparé au temps réel du trajet afin de voir le poids de la charge mentale, psychologique et physique des composantes des différents trajets.

Le temps de parcours est la variable la plus évidente lors de l'analyse de la qualité d'un trajet TC. Cependant, le temps perçu est lié directement à l'expérience des usagers du transport collectif et donne une très bonne idée de la qualité du réseau.

La perception du temps est une variable importante car dans les situations jugées pénibles, le temps peut paraître plus long que ce qu'il est réellement. Le temps perçu varie d'une personne à une autre. Ainsi, différents types de personnes doivent donc être pris en compte dans l'identification de facteurs de pénibilité.

Le nombre et le type de correspondance influence aussi la qualité perçue des trajets. Les correspondances peuvent être mal perçues par les usagers en raison du temps d'attente au point de correspondance. Le risque de manquer le transfert vers la ligne suivante augmente aussi la pénibilité liée aux correspondances. Les correspondances entraînent un certain stress physique et psychologique chez les usagers. De plus, une correspondance vers une ligne à haute fréquence comparativement à une ligne à basse fréquence est beaucoup moins pénalisante.

La fiabilité du service tient compte du risque de panne et du respect de l'horaire.

Le confort, le temps d'attente, la présence d'abribus, le détour par rapport au trajet à vol d'oiseau, la distance de marche sont d'autres facteurs qui impactent le choix du mode et du trajet. Le Transit Capacity and Quality of Service Manual (TCQSM) fournit un guide pour déterminer la qualité du service de TC.

Le concept d'équité est aussi important dans ce projet. En effet, chaque individu devrait avoir accès à au moins un trajet TC atteignant un seuil de qualité minimal. Un réseau de transport devrait offrir des options de transport qui permettent à tous de se déplacer dans un temps convenable. Les conditions à bord et en dehors du véhicule sont tout autant importantes dans la détermination de la qualité des options de TC. Tous les individus devraient avoir accès à un transport en commun qui offre une bonne accessibilité aux services de base. Si les options de TC offertes ne satisfont pas le seuil minimal de qualité, les individus affectés peuvent être socialement exclus. Le réseau de transport collectif devrait être inclusif, de manière à offrir plusieurs options de trajet pour divers types de personne.

#### *2.1.9.3 Objectifs du projet*

Les objectifs de ce projet sont triples. Le premier objectif vise à identifier les facteurs qui impactent le choix d'un trajet en transport collectif et à quantifier ces coefficients de pénibilité. Le deuxième objectif est de créer une équation de coût généralisé et de calculer le temps perçu à partir de celle-ci afin de le comparer au temps réel. Finalement, le troisième objectif est de créer un modèle qui permettra de catégoriser les trajets offerts en différents types de trajet. Ce modèle sera éventuellement intégré à la plateforme Transition.

#### *2.1.9.4 Méthodologies des projets précédents*

Une méthodologie qui permet de mesurer la qualité et la diversité des alternatives de trajet TC a été développée par Frappier (2015). L'indicateur de qualité est celui qui est intéressant pour ce projet. La première étape de sa méthodologie était de définir une demande de déplacements en TC, définie par une paire OD et une heure de départ. Avec un calculateur de chemin, un ensemble de choix de trajets est généré. Par la suite, plusieurs indicateurs de qualité sont créés (par exemple : indicateur de temps, indicateur de coût, indicateur de correspondance, etc.). Ces indicateurs permettent de classer les alternatives de trajets en ordre de la meilleure option à la pire selon les critères de qualité.

Une autre méthodologie qui permet de mesurer la qualité et la diversité des alternatives de trajet TC a été développée par Poirier (2021). Pour commencer, les paires OD utilisant comme mode le TC unimodal (avec la marche comme mode d'accès) ont été sélectionnées parmi les données de l'Enquête OD de 2018. Pour ces paires OD, les alternatives de TC sont générées grâce à la plateforme Transition. Par la suite, parmi les alternatives suggérées, le trajet déclaré dans l'enquête OD est identifié. Finalement, la diversité des alternatives peut donc être analysée. Par la suite, des seuils de qualité suffisante relative (basé sur le temps de parcours de l'alternative la plus rapide) et absolue (basé sur une vitesse théorique sur le trajet en vol d'oiseau entre l'origine et la destination) sont suggérés. Pour le seuil de qualité absolue, la vitesse théorique de référence choisie (20 km/h) et la distance euclidienne entre la paire OD permet de calculer le temps théorique de transport. Par la suite, le ratio entre le temps théorique et le temps réel de déplacement est calculé afin d'obtenir une valeur de détour.

#### *2.1.9.5 Méthodologie envisagée*

Les données de l'enquête Origine Destination de 2018 de Montréal et de Québec ainsi que les données de carte à puce seront utilisées afin d'obtenir la demande observée. Ces données OD

peuvent être entrées dans la plateforme Transition pour analyser les trajets possibles en TC. Les données du réseau de transport en commun pour l'année du projet seront aussi utilisées.

Les facteurs pénalisant du transport collectif seront quantifiés et introduits dans une équation de coût généralisé afin d'obtenir une valeur de temps perçu des trajets. Le temps réel sera ensuite comparé au temps perçu. Si les trajets respectent le seuil minimal de temps perçu, ces trajets de TC représentent des options de qualité suffisante. Le seuil minimal de qualité doit être établi. Ensuite, un modèle qui permet de catégoriser les trajets sera construit.

La méthodologie précise de ce projet est en développement.

#### *2.1.9.6 Perspectives du projet*

Le projet va permettre d'actualiser les connaissances sur les facteurs pénalisant qui impactent le choix d'un trajet de transport en commun. Le projet va aussi permettre d'avoir une catégorisation des trajets offerts sur Transition. Les trajets pourront être séparés en différentes catégories, par exemple : "Trajet minimisant le temps total de déplacement", "Trajet minimisant le temps d'accès à l'arrêt d'embarquement", "Trajet minimisant les correspondances". Ceci va permettre aux usagers d'avoir plus d'informations sur les trajets qui leur sont proposés afin de faire un choix qui est adapté pour chacun.

## 2.1.10 Modélisation de la motorisation des ménages et de l'accès au véhicule privé

Par : Antoine Laporte, maîtrise

Supervision : Pre Catherine Morency

Contexte : Chaire Mobilité

Date de fin prévue : août 2025

### 2.1.10.1 Introduction

Afin de limiter le réchauffement climatique et ses impacts sur notre monde, il faut drastiquement réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES). Au Québec, la principale source de GES est due au transport. Le transport sur route est responsable à lui-seul de 34,4% des émissions GES au Québec (MELCC, 2021). Il est donc essentiel d'agir pour réduire ces émissions. Le gouvernement du Québec l'écrit dans son plan de mobilité durable avec des cibles comme : « Diminution de 20 % des déplacements effectués en auto solo à l'échelle nationale » et « Réduction de 37,5% des émissions de GES dans le secteur des transports sous le niveau de 1990 » (MTMD, 2018). Pourtant, le parc automobile augmente plus rapidement que la population en âge de conduire (SAAQ, 2022). Comme la possession d'une voiture favorise grandement son utilisation au détriment des autres modes de transport (Lucas and Jones, 2009), il est nécessaire de déterminer et de comprendre les facteurs influençant le taux de motorisation. Ainsi, il sera possible d'émettre des recommandations permettant de réduire le taux de possession automobile et conséquemment d'en réduire l'usage.

### 2.1.10.2 Objectifs

Démontrer un lien de causalité entre l'offre multimodale de transport et le taux d'accès à l'automobile (personnes, ménages, zones)

**SO1** : Proposer des indicateurs de quantification de l'évolution de l'offre multimodale de transport dans les voisinages des ménages et zones et proposer des seuils significatifs témoignant d'une bonification, d'une réduction ou du maintien des services

**SO2** : Définir des indicateurs d'accès aux véhicules privés pour différents objets : ménages, personnes, zones et analyser les tendances.

**SO3** : Appliquer différents modèles de causalité et comparer leurs performances.

### 2.1.10.3 Méthodologie envisagée

Afin de comprendre les comportements de mobilité des résidents et des ménages il faut d'abord connaître les choix qui s'offrent à eux (SO1). Les données provenant de la société de l'assurance automobile du Québec (SAAQ) et du recensement canadien permettront de connaître le nombre de véhicules immatriculés ainsi que le nombre de conducteurs potentiels. Les enquêtes Origine-Destination (OD) permettent aussi de mieux estimer le nombre de véhicules par ménage. Pour évaluer l'offre de transport, la proximité à des arrêts d'autobus, de métro ou à des gares de train sera utilisée, de même que le nombre de passages par arrêt par heure. L'offre des services de vélopartage et d'autopartage sera évaluée à l'aide des partenaires sur le territoire québécois, soit BIXI et Communauto. En utilisant les données des enquêtes précédentes et des archives des partenaires, il sera possible d'observer leur évolution temporelle. Il faut ensuite observer les choix de mobilité qui sont faits par la population pour comprendre l'influence de l'offre de transport et du taux de motorisation (SO2) sur les comportements. En utilisant les données des enquêtes OD qui sont temporellement et spatialement référencées et qui décrivent précisément les déplacements de près de 750 000 ménages lors d'une journée de semaine, il est possible de modéliser les comportements de mobilité des ménages et d'agréger les données afin de



représenter les comportements des secteurs municipaux. Le modèle de causalité du taux de motorisation en fonction de l'offre de transport sera basé sur un modèle appliqué par Deschaintres et al (2021) (SO3). Il sera calibré avec différents groupes de contrôle et groupes expérimentaux qui ont eu une bonification de leur offre de transport. Il sera testé et validé sur différentes régions par la suite.

#### *2.1.10.4 Importance de la recherche*

En ce moment, des corrélations entre les différents facteurs et le taux de motorisation sont observables, mais démontrer un lien de causalité entre une bonification de l'offre de transport et le taux de motorisation permettrait de mieux comprendre les mécanismes qui mènent à des changements dans la façon d'accéder à l'automobile. Cette compréhension permettrait d'émettre des recommandations aux gouvernements ou aux villes quant aux moyens à utiliser pour permettre aux ménages de ne pas augmenter le nombre de véhicules qu'ils possèdent ou même, de réduire leur motorisation. Dans un contexte de changement climatique, la réduction du parc automobile permettrait de réduire le nombre de trajets effectués en voiture privée et par le fait même, de réduire les émissions de GES. Il serait aussi possible de réduire l'espace réservé au stationnement et de réduire la congestion routière.

### 2.1.11 Méthode de fusion et d'actualisation d'enquêtes

Par : Hubert Verreault, professionnel de recherche

#### 2.1.11.1 Introduction

Au cours des dernières années, les changements dans les comportements de mobilité ont été non seulement importants mais également rapides. Ces changements sont liés à de multiples facteurs qui s'entremêlent tels que l'augmentation de la population, le vieillissement de la population, l'adoption du télétravail à grande échelle et l'évolution des comportements de mobilité. Ces évolutions ont engendré un besoin crucial de données actualisées et précises en matière de transport, indispensables à la planification et à la gestion efficaces des infrastructures de transport dans un environnement dynamique en constante évolution.

Dans ce contexte, les enquêtes Origine-Destination (OD) représentent et demeurent un aspect important et essentiel de la collecte de données sur la mobilité. Ces enquêtes fournissent des informations cruciales sur les déplacements des individus, leurs motifs de déplacement, les modes de transport utilisés, ainsi que les caractéristiques démographiques et géographiques des populations étudiées. Cependant, la fréquence de ces enquêtes pose un défi majeur : une enquête menée tous les 5 ou 10 ans peut-elle encore capturer de manière adéquate les évolutions rapides et complexes des comportements de mobilité ? Avoir de nouvelles données à jour est de plus en plus important et demandé. Cependant, différents enjeux sont de plus importants dans la collecte de données de type Origine-Destination et rendent la collecte de données plus difficile.

Parmi les enjeux, la réduction des taux de réponse qui implique la difficulté d'obtenir des échantillons de grandes tailles ou les biais d'échantillonnage. Il y a plusieurs solutions qui ont été expérimentées dans les dernières années : bases de sondage multiple, question roulante, multi-recrutement, plusieurs outils de collecte, etc. Cependant, le post-traitement de ces données devient de plus complexe, particulièrement pour le calcul des facteurs de pondération.

La plupart des régions ont recueilli énormément d'informations à partir de sondages sur la mobilité dans les dernières décennies. Cependant, ce patrimoine de données, qui est considérable, demeure peu exploité dès lors qu'une nouvelle enquête devient disponible ou après quelques années. À Montréal, les enquêtes de type Origine-Destination sont réalisées depuis 1970. Cependant, l'exploitation optimale de ces données nécessite une approche innovante pour les actualiser, les fusionner avec des données plus récentes et en tirer des informations pertinentes pour la planification des transports.

Dans ce contexte, plusieurs questions d'intérêts peuvent être soulevées :

- À partir de quel moment des données de mobilité de type OD sont-elles dépassées ?
  - Dès qu'une enquête plus récente devient disponible?
  - Après 1 an ? Dès la fin de la collecte ?
- Est-ce que d'anciennes données peuvent encore être représentatives de certains comportements ?
  - Et si des changements majeurs surviennent ?
- Est-ce que l'on pourrait appliquer un "traitement" ou une « cure de rajeunissement » sur les données afin de les utiliser sur une plus longue période ?

#### 2.1.11.2 Objectif

Cette étude comporte plusieurs objectifs en lien avec les éléments de contexte discutés précédemment. Tout d'abord, l'objectif principal est de développer une méthodologie robuste de

fusion et d'actualisation des données issues des enquêtes Origine-Destination (OD) montréalaises. Cette méthode vise à également valoriser le patrimoine de données d'enquête OD de la région. Cette méthodologie doit être capable de combler les laps de temps entre les enquêtes, en prenant en compte les évolutions contextuelles (population, motorisation, etc.) de comportements de mobilité.

Concrètement, la méthodologie vise à combiner des échantillons d'enquêtes provenant de périodes temporelles distinctes, soient 2013 et 2018, en s'assurant que l'échantillon combiné est représentatif de la période souhaitée. On souhaite obtenir à la fin de la méthodologie un fichier d'enquête qui comprend plusieurs avantages :

- un échantillon qui comble certains biais d'échantillonnage
- des comportements (et indicateurs) de mobilité représentatifs de l'année de référence
- un échantillon plus grand (environ 8%)

#### *2.1.11.3 Méthodologie générale*

Afin d'expérimenter et de développer la méthode, les enquêtes OD de 2013 et 2018 de la région de Montréal ont été utilisées. L'objectif est donc d'intégrer les échantillons provenant des deux enquêtes afin d'obtenir un portrait de la mobilité de 2018. Bien entendu, plusieurs changements dans les facteurs contextuels ainsi que dans les comportements de mobilité ont été aperçus entre 2013 et 2018 dans la région. Parmi ceux-ci, l'augmentation de la population ainsi que son vieillissement, la construction de nouveaux développements résidentiels, commerciaux et industriels, des changements dans les comportements de mobilité et des modifications aux différents réseaux de transport. Sur ce dernier point, il est à souligner que la ligne de train de banlieue de Mascouche a été mise en opération entre 2013 et 2018.

Ces changements permettent de conclure qu'il n'est pas possible de simplement fusionner les échantillons et de les repondérer. On obtiendrait alors une moyenne des comportements de mobilité de 2013 et 2018. La méthode développée doit donc absolument prendre en considération ces changements.

#### *Données*

Les données utilisées dans le cadre de cette étude concernent uniquement les échantillons des enquêtes de 2013 et de 2018 de la région de Montréal. Ces enquêtes ont été réalisées avec une méthode assez semblable avec un questionnaire assez similaire. Une grande majorité des informations recueillies sont donc disponibles dans les deux fichiers. Les taux d'échantillonnage pour les enquêtes de 2013 et de 2018 sont respectivement de 4,4% et de 3,8% à l'échelle de la région. Les facteurs de pondération respectifs de ces enquêtes permettent de reconstruire les populations de 2011 et de 2016.

#### *Méthodologie*

La méthodologie de fusion des échantillons se base principalement sur l'altération des facteurs de pondération des personnes afin de représenter la population et les comportements de mobilité de 2018. La méthode développée utilise l'actualisation proportionnelle itérative (IPU) afin de repondérer les échantillons provenant des deux enquêtes à partir de différentes contraintes basées sur le référentiel de 2018. Cette méthode statistique permet d'ajuster les facteurs de pondération d'un échantillon afin qu'ils reflètent les distributions conjointes de deux objets de l'échantillon simultanément. Habituellement, cette méthode est utilisée dans le cadre de la création d'une population synthétique ou dans le cadre de l'estimation de facteurs de pondération permettant à la fois de reconstruire les populations de ménages et de personnes

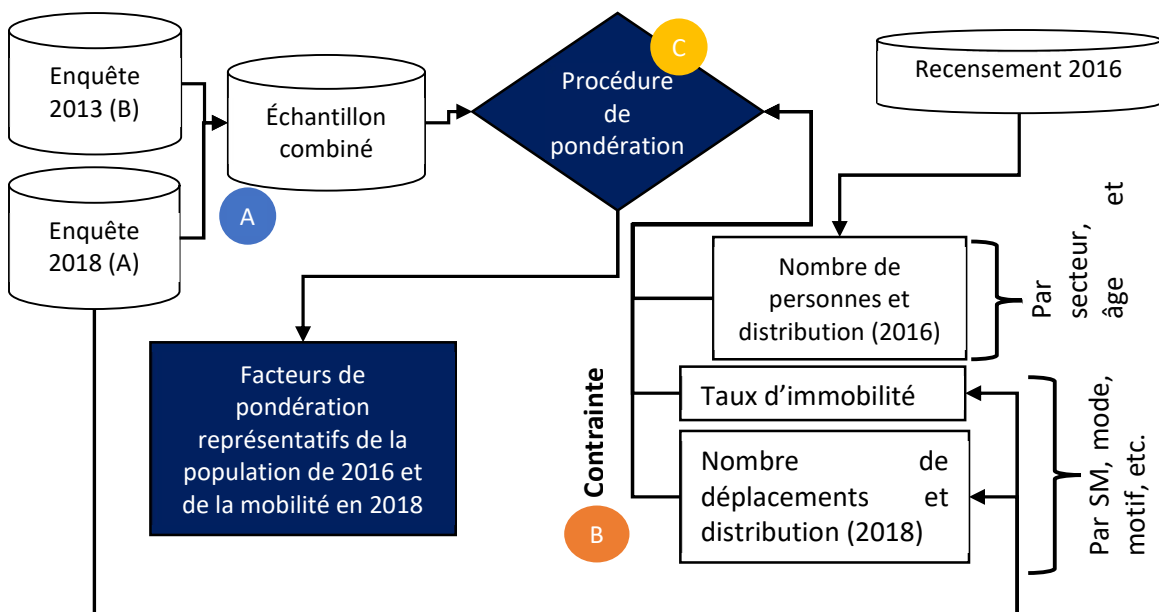
d'une enquête. Dans le cadre de cette étude, la méthode sera utilisée de façon innovante en visant à estimer des facteurs de pondération s'appliquant aux personnes permettant de reproduire à la fois les populations et les contraintes liées aux comportements de mobilité.

L'utilisation de la méthode IPU demande premièrement de spécifier des contraintes à respecter au niveau de la reconstruction des chiffres de référence. Les contraintes utilisées se basent donc sur les populations de personnes, basées sur le recensement de 2016, ainsi que sur la mobilité des résidents de la région de Montréal, basée sur les chiffres de l'enquête OD 2018. L'algorithme ajuste itérativement les facteurs de pondération des personnes afin qu'ils répondent à l'ensemble des contraintes spécifiées. L'objectif de la méthode est donc de trouver les meilleurs facteurs de pondération pour les personnes (Échantillon combiné) permettant de reconstruire les populations de personnes et les comportements de mobilité observés en 2018.

La méthodologie complète se segmente en différentes étapes

- A. Combinaison des échantillons
- B. Choix et calculs des contraintes à respecter
- C. Procédure de pondération de l'échantillon.

Le schéma de la Figure 2-27 illustre cette méthodologie.



Méthodologie segmentée en secteurs municipaux (SM)

Figure 2-27 Méthodologie générale

Les contraintes correspondent à l'étape la plus importante de la méthodologie. La comparaison des comportements de mobilité et l'évolution des facteurs contextuels de ceux-ci permettent d'identifier les types de contraintes à intégrer dans la méthode. Dans le cadre de cette étude, les contraintes ainsi que la repondération des échantillons sont à l'échelle des secteurs municipaux (SM). Les contraintes sont segmentées selon les deux objets mentionnés précédemment, soit basées sur la démographie ou sur les déplacements.

- Démographie (2016)

- Nombre de personnes par genre
- Nombre de personnes par cohorte (5 – 19 ans, 20 – 29 ans, 30 – 39 ans, 40 – 49 ans, 50 – 64 ans, 65 ans et plus)
- Déplacements (2018)
  - Taux de non-mobilité
  - Nombre de déplacements
    - par motif
    - par mode
    - par région de destination
    - par ligne de train

Le Tableau 2-16 présente les populations de référence (2016) et les déplacements de référence (2018) reconstruits à partir des facteurs de pondération résultant de l’algorithme de pondération. L’algorithme ayant comme objectif de reconstruire les distributions des deux objets, les résultats montrent, que bien que les facteurs de pondération obtenus permettent de reconstruire assez fidèlement les facteurs de pondération, il y a quand même des écarts qui sont observés. En général, les populations et les déplacements de référence sont surestimés par les facteurs.

Tableau 2-16 Reconstruction des populations et des déplacements de référence à partir des facteurs obtenus par l’IPU

Cohorte	Population			Déplacements		
	Homme	Femme	Total	Homme	Femme	Total
5 – 19 ans	1,5%	-0,3%	0,6%	0,4%	-0,8%	-0,2%
20 – 34 ans	0,3%	0,8%	0,6%	-0,5%	-0,1%	-0,3%
35 – 49 ans	0,4%	0,8%	0,6%	1,2%	1,5%	1,3%
50 – 64 ans	1,3%	-0,1%	0,6%	1,8%	0,3%	1,1%
65 ans et plus	0,1%	1,1%	0,6%	-0,8%	-0,7%	-0,8%
<b>Total</b>	<b>0,7%</b>	<b>0,4%</b>	<b>0,6%</b>	<b>0,6%</b>	<b>0,2%</b>	<b>0,4%</b>

Bien que la méthode IPU ait l’objectif de reconstruire les contraintes des deux objets mentionnés, selon l’échantillon disponible et les différents biais, il n’est pas toujours possible de le faire tel qu’illustré au Tableau 2-16. Un ajustement final est donc appliqué finalement aux facteurs de pondération estimés afin que ces derniers facteurs reproduisent parfaitement les personnes de la population de référence. De plus, cette étape permet également d’affiner à 5 ans les groupes utilisés dans la pondération. Ce facteur d’ajustement se calcule à l’aide de l’équation suivante :

$$A_{PerSGA} = \frac{Population\ Mobile_{SGA}}{\sum w_{iSGA}}$$

où S est le secteur, G est le genre and A est le groupe d’âge de 5 ans.

Les résultats obtenus correspondent donc à deux séries de facteurs de pondération portant respectivement sur les personnes et les déplacements.

#### 2.1.11.4 Résultats

Les résultats présentés dans cette section ont été estimés à partir des deux séries de facteurs de pondération ajustés mentionnées précédemment. Ces résultats visent à illustrer la fusion des échantillons et la repondération des facteurs de pondération permet de reconstruire les grands indicateurs de mobilité estimés à partir de l'enquête OD 2018.

Premièrement, la Figure 2-28 illustre les parts modales estimées à partir de l'échantillon et des facteurs de pondération de 2013, de 2018 et à partir des échantillons combinés. L'objectif est donc de reconstruire les comportements de 2018 à partir de l'échantillon combiné. Les comportements de mobilité ont évolué quelque peu entre 2013 et 2018 au niveau des parts modales. Les parts des déplacements auto-conducteur et auto-passager ont diminué quelque peu passant respectivement de 54,9% à 54,6% et de 12,6% à 11,9% tandis que les parts des autres modes ont augmenté. L'enquête combinée permet de son côté de reproduire presque parfaitement les parts modales de l'ensemble des modes.

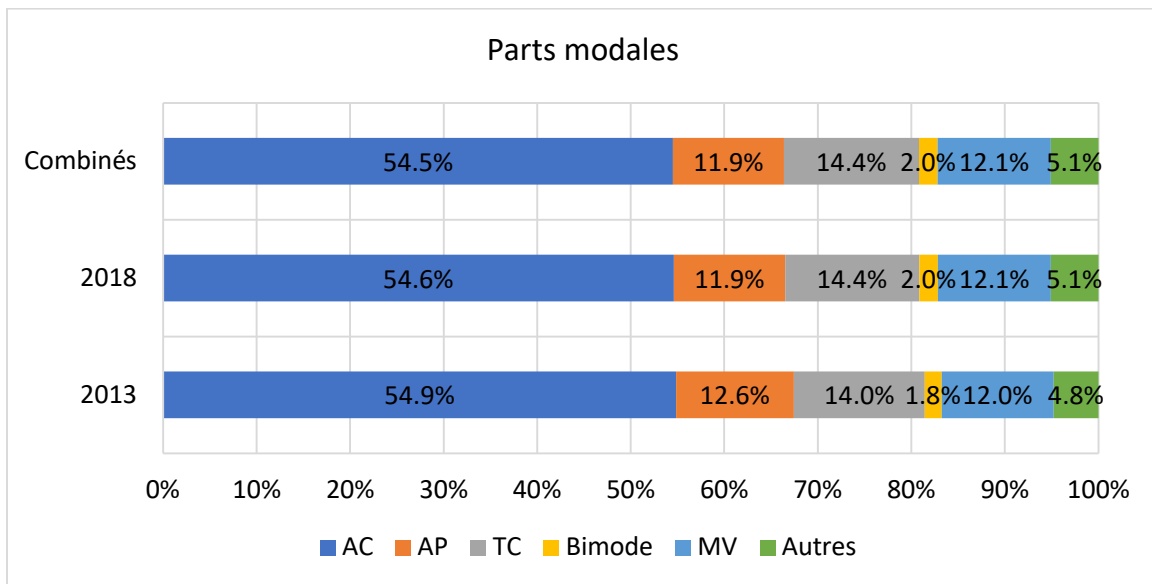


Figure 2-28. Parts modales des déplacements estimés pour 2013, 2018 et pour l'échantillon combiné

La Figure 2-29 illustre les répartitions des motifs d'activités estimés à partir de l'échantillon et des facteurs de pondération de 2013, de 2018 et à partir des échantillons combinés. La comparaison des résultats des enquêtes de 2013 et 2018 illustre que la proportion de certains motifs d'activité a évolué en 5 ans. Le fichier combiné permet cependant de bien reconstruire la répartition de 2018.

### Répartition des motifs

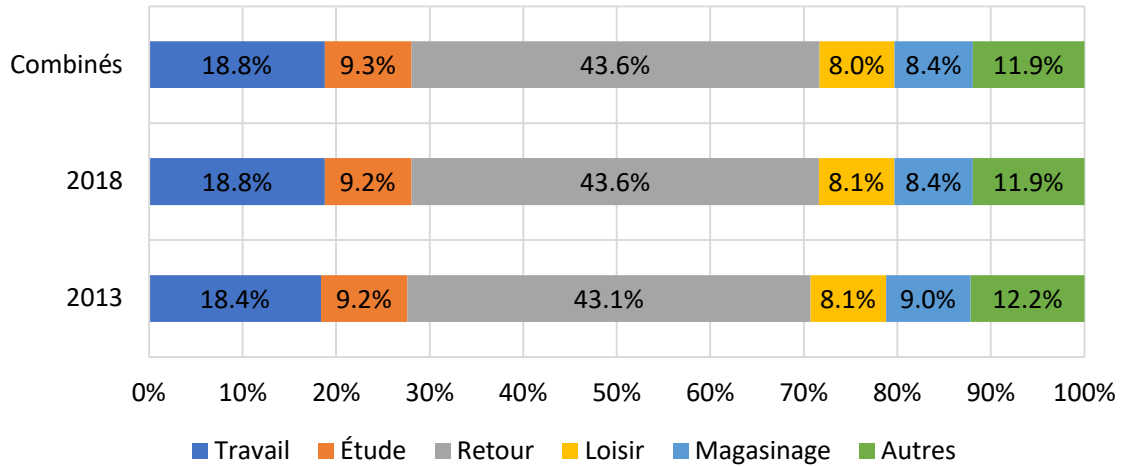


Figure 2-29. Répartition des motifs de déplacements estimés pour 2013, 2018 et pour l'échantillon combiné

Finalement, la Figure 2-30 illustre la répartition des destinations estimées à partir de l'échantillon et des facteurs de pondération de 2013, de 2018 et à partir des échantillons combinés. La comparaison des résultats des enquêtes de 2013 et 2018 illustre que les répartitions des destinations ont quelque peu évolué en 5 ans. Le fichier combiné permet cependant de reconstruire presque parfaitement la répartition de 2018.

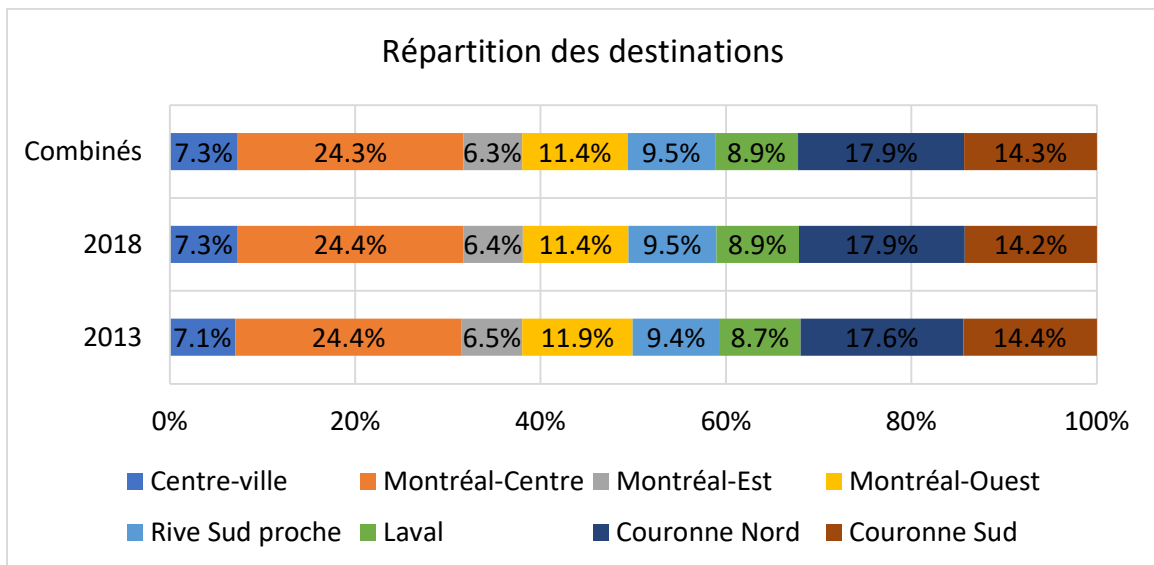


Figure 2-30. Répartition des régions de destinations estimées pour 2013, 2018 et pour l'échantillon combiné

Les résultats précédents montrent que l'échantillon combiné permet d'assez bien reproduire les indicateurs globaux de 2018. L'évolution des indicateurs de mobilité étant assez faible entre 2013 et 2018, il est intéressant de regarder un aspect qui a évolué beaucoup plus grandement entre 2013 et 2018. Les achalandages des lignes de trains de banlieue ont subi des changements importants entre 2013 et 2018 selon les fichiers d'enquête OD. De plus, la ligne de train de Mascouche est entrée en opération entre 2013 et 2018. Les différences entre les nombres de



déplacements utilisant ces lignes sont donc importantes. Le Tableau 2-17 présente les nombres de déplacements selon la ligne de train de banlieue pour 2013, 2018 et pour l'échantillon combiné. Ces résultats démontrent que la méthode développée a permis à l'enquête combinée de très bien reproduire les nombres de déplacements par ligne. Les différences entre l'enquête combinée et les résultats de 2018 sont assez petites pour l'ensemble des lignes, même pour la ligne de Mascouche. Cela démontre la puissance de la méthode à reproduire les contraintes des déplacements, même pour des échantillons très différents.

Tableau 2-17 Nombre de passagers par ligne de train de banlieue pour 2013, 2018 et pour l'enquête combinée

Nombre de déplacements par ligne	Lignes de train					
	Vaudreuil	Deux-Montagnes	Saint-Hilaire	Blainville	Candiac	Mascouche
2013	27 222	48 616	13 910	19 145	5 786	0
2018	32 770	51 616	11 424	24 306	7 243	14 468
2013-2018	5 549	3 001	-2 486	5 161	1 458	14 468
Combinés	32 577	51 611	11 511	24 337	7 336	14 379
Combinés-2018	-194	-5	87	31	93	-89

Un des avantages les plus importants à fusionner des échantillons provenant de plusieurs enquêtes est d'augmenter la taille de l'échantillon et de diminuer, par le fait même, la taille des facteurs de pondération. Les facteurs maximums des enquêtes de 2013 et de 2018 étaient respectivement de 151 et de 335 tandis que le facteur maximum provenant de la fusion des échantillons est de 66. Le facteur moyen des échantillons de l'enquête de 2018 était de 25,8 tandis que celui de cet échantillon dans l'enquête combinée est de 13,2. Pour l'enquête de 2013, le facteur moyen était de 22,9 tandis que celui de cet échantillon dans l'enquête combinée est de 11,5. La Figure 2-31 illustre la distribution des facteurs de pondération pour 2018 et pour l'enquête combinée.

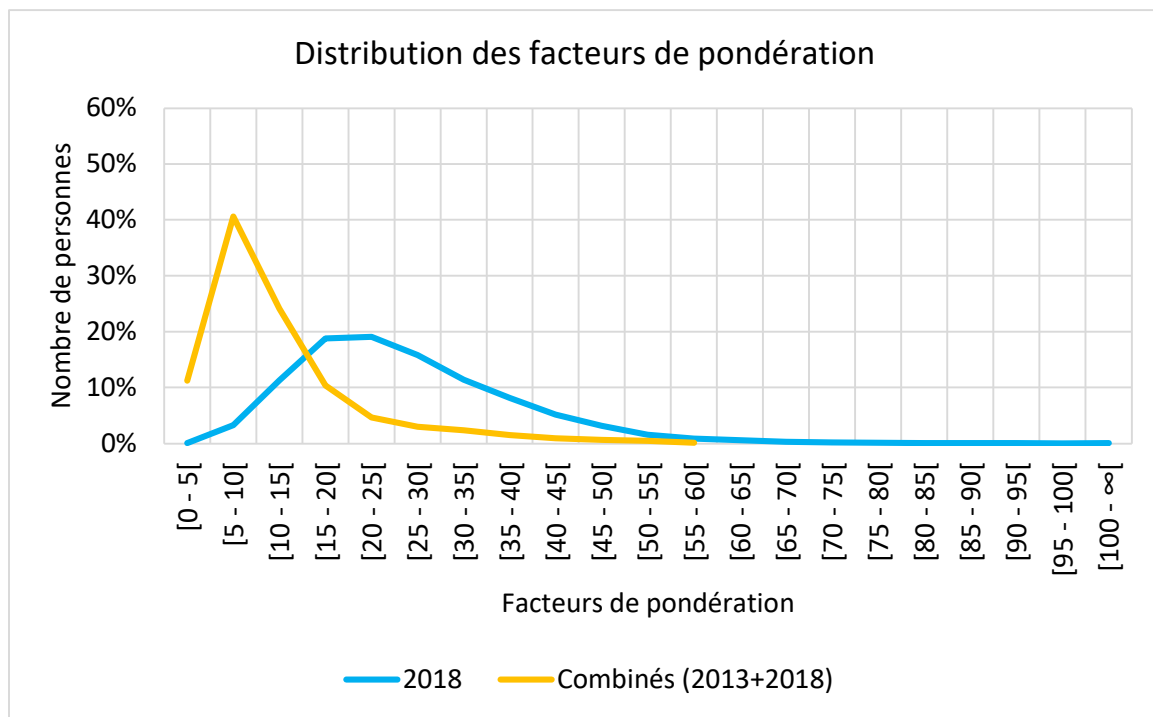


Figure 2-31. Distributions des facteurs de pondération pour 2018 et pour l'enquête combinée

Finalement, le Tableau 2-18 présente le poids des échantillons dans l'enquête combinée selon l'utilisation ou non des facteurs de pondération. Initialement, la taille de l'échantillon de l'enquête de 2013 était plus grande que celle de 2018. Cependant, après les facteurs de pondération, le poids de l'enquête de 2018 devient plus élevé que celui de 2013. La volonté de reproduire les comportements de mobilité de 2018 demande donc évidemment une utilisation plus importante de l'échantillon de l'enquête de 2018.

Tableau 2-18. Répartition des poids des échantillons de 2013 et 2018 dans l'enquête combinée

OD	Non pondéré	Pondéré
2018	47,8%	51,4%
2013	52,2%	48,6%

#### 2.1.11.5 Conclusion

Cette section présente une méthodologie innovante de fusion et d'actualisation d'enquêtes Origine-Destination (OD) dans la région de Montréal. Une méthodologie basée sur l'Actualisation Proportionnelle Itérative (IPU) pour fusionner et actualiser les données d'enquêtes OD a été développée. Cette méthodologie a été appliquée à deux enquêtes menées en 2013 et 2018 dans la région de Montréal. Des contraintes basées sur les données de référence pour la mobilité et la population ont été identifiées, puis appliquées par l'IPU de manière segmentée pour tenir compte des variations locales. L'ajustement final des facteurs de pondération a permis d'obtenir des résultats encourageants, avec une réduction significative des facteurs de pondération moyens et une meilleure représentativité de la population et des comportements de mobilité actuels. En conclusion, cette étude ouvre la voie à de nouvelles approches pour l'analyse et l'utilisation des données d'enquêtes OD.

Malgré les résultats encourageants obtenus grâce à la méthodologie, il est important de reconnaître certaines limitations. Des changements majeurs dans les comportements de mobilité entre deux enquêtes pourraient rendre la méthode moins efficace. De plus, la recherche de nouveaux comportements et les différences entre les enquêtes pour établir les contraintes peuvent représenter une tâche ardue et longue. Enfin, la méthodologie présentée n'est pas sans contraintes et nécessite une adaptation minutieuse aux spécificités de chaque contexte.

Les perspectives de recherche ouvertes par cette étude sont nombreuses. Tout d'abord, la méthodologie d'intégration développée doit être testée avec différentes combinaisons de contraintes afin d'analyser la sensibilité des résultats. Des tests à différentes échelles spatiales, des contraintes croisées, et d'autres variations sont nécessaires pour une compréhension approfondie des capacités et des limites de la méthode. De plus, l'exploration de l'utilisation de cette méthodologie pour des enquêtes de fréquence annuelle ou en continu, la combinaison de grandes enquêtes, ou la projection en fonction de contraintes externes, offrent des pistes intéressantes.

### 2.1.12 État d'avancement du développement de la plateforme Transition

Par : Pierre-Léo Bourbonnais, Geneviève Bastien et Yannick Brosseau, professionnels de recherche

Les développements de Transition ont continué cette année, afin de rendre la plateforme plus robuste et fiable, en collaboration avec les partenaires du projet. Il y a eu 143 "*pull requests*" complétées, ainsi que 75 tickets fermés. En revanche, 103 nouveaux tickets ont été ajoutés cette année. Le code source, ainsi que le suivi des tickets est disponible publiquement sur github (<https://github.com/chairemobilite/transition>).

Plusieurs améliorations ont été apportées aux calculs multiples et à la gestion de ses résultats. Une meilleure gestion des redémarrages des tâches en cas d'erreur a été mise en place, ainsi qu'une sauvegarde systématique des résultats dans la base de données. Ces optimisations permettent d'assurer une plus grande fiabilité et une récupération plus aisée des données en cas de problème.

L'intégration du nouvel API v2 du calculateur de chemin *trRouting* (<https://github.com/chairemobilite/trRouting>) a été réalisée, permettant de profiter d'un API plus léger et clair. Cette évolution facilite l'utilisation et la maintenance du calculateur, tout en offrant une meilleure expérience utilisateur.

Le calculateur de chemin *trRouting* a bénéficié d'une amélioration significative de ses performances, à la suite de la ré-architecture débutée l'année précédente. La parallélisation des requêtes a également contribué à optimiser le traitement des données et à réduire les temps de réponse.

Lors de l'import des données *GTFIS*, une nouvelle option a été ajoutée pour permettre aux utilisateurs de conserver l'emplacement exact des arrêts, au lieu d'utiliser une position agrégée. Cette fonctionnalité offre une plus grande flexibilité et une meilleure précision dans la localisation des arrêts de transport en commun, au prix d'un temps de calcul un peu plus long.

Un travail conséquent a été réalisé sur le module d'authentification, qui fait partie de la librairie commune avec les applications d'enquête utilisant la plateforme *Évolution* (<https://github.com/chairemobilite/evolution>), également développée par la Chaire Mobilité. Cette initiative vise à renforcer la sécurité et à uniformiser le processus d'authentification à travers les différentes applications.

En plus de ces développements, les développeurs de Transition ont supervisé une équipe de 6 étudiants dans le cadre de leur projet intégrateur de 4<sup>e</sup> année de génie informatique. Ces étudiants ont contribué à l'ajout d'une fonctionnalité expérimentale permettant à l'affichage de montrer séparément les différents trajets, au lieu de les superposer (Figure 2-32). Cette nouveauté améliore la lisibilité et la compréhension des itinéraires proposés.

Enfin, les étudiants ont réalisé une preuve de concept pour l'utilisation de la librairie Deck.GL en remplacement de la librairie non libre Mapbox, qui a maintenant une licence trop restrictive pour l'open-source. Cette initiative a facilité l'intégration ultérieure de Deck.GL au sein de Transition, un travail qui est encore en cours de développement. À terme, cette transition vers une librairie libre renforcera l'indépendance et la pérennité de la plateforme.



Figure 2-32 Comparaison avant (à gauche) - après (à droite) l'ajout de la fonctionnalité des trajets affichés séparément

### 2.1.13 Défis et enjeux de l'électrification des transports

Par : Brigitte Milord, professionnelle de recherche

#### 2.1.13.1 Introduction

Alors que la communauté internationale cherche des moyens pour atteindre la carboneutralité, les émissions de GES du secteur des transports ont augmenté de manière alarmante depuis 1990, annulant même les gains réalisés dans les autres secteurs, notamment résidentiel et industriel. Au Québec, les gains réalisés ces 30 dernières années ont été annulés par une hausse équivalente de 30 % des émissions en transport. À l'échelle internationale, il est observé que les juridictions qui peinent à contrôler leurs émissions en transport, peinent également à réduire leurs émissions globales (Figure 2-31). Ces juridictions ont généralement en commun d'être reconnue pour leur dépendance à l'automobile. Alors que les experts recommandent un budget carbone de 2 tonnes par habitant pour limiter les changements climatiques, les émissions en transport au Québec excèdent à elles seules par deux fois ce budget.

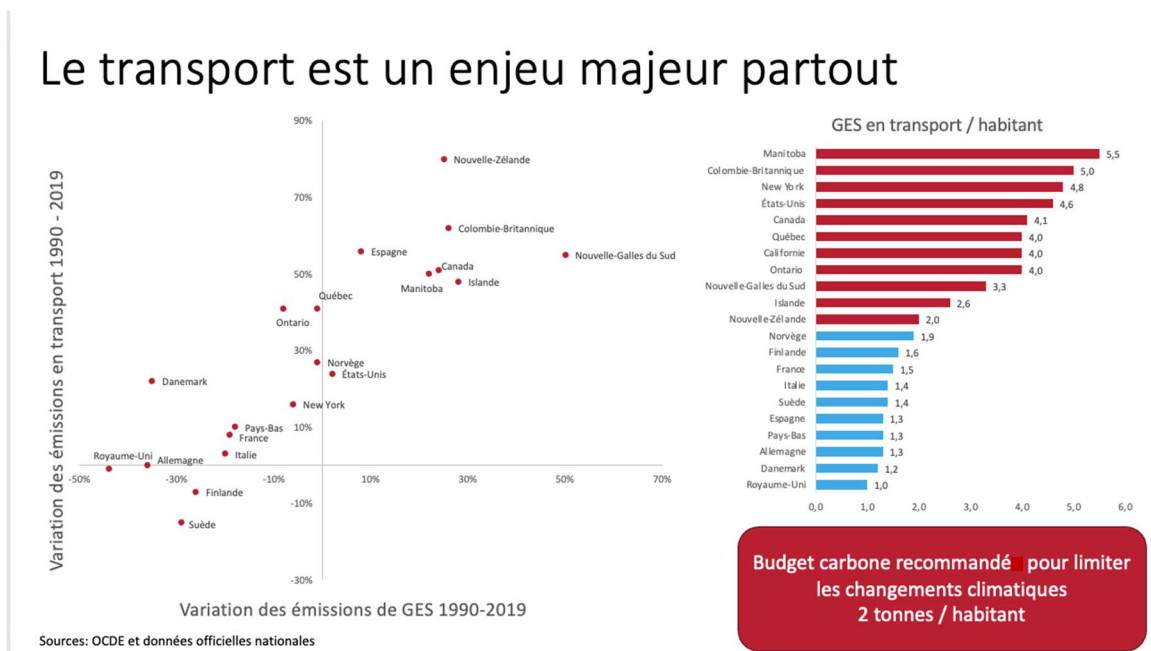


Figure 2-33. Comparaison internationale des émissions de GES en transport et totaux (Sources : OCDE Stats et données nationales, voir rapport complet pour l'ensemble des références)

L'électrification apparaît désormais comme une solution incontournable pour réduire les émissions provenant du secteur des transports, mais également pour atteindre d'autres cibles gouvernementales (ex. création d'emplois verts, réduction de la consommation d'énergies fossiles). Les gouvernements ont de ce fait consacré plusieurs milliards de dollars à ce jour pour stimuler l'innovation au sein de l'industrie et encourager les consommateurs, les entreprises et les organismes publics à adopter cette technologie. Les investissements à venir seront d'autant plus grands. Dans le cadre de la 26<sup>e</sup> Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (COP26), le gouvernement du Québec a notamment annoncé une somme de 5 G\$ pour la mise en service de 2148 autobus d'ici 2030, soit la moitié des autobus urbains en circulation opérés par le secteur public.

Cet engagement en faveur d'un processus d'acquisition à grand volume constitue un jalon important et une des cibles les plus ambitieuses de l'Amérique du Nord selon le gouvernement

du Québec. Dans son plus récent rapport, la Commissaire au développement durable du Québec note cependant que le gouvernement du Québec engage des sommes considérables dans l'électrification et la lutte aux changements climatiques sans avoir préalablement évalué la performance des actions mises de l'avant. Le temps et les ressources étant limités pour atteindre la carboneutralité, il faut s'assurer que les efforts et les ressources soient dédiés aux mesures les plus efficaces. L'argent consacré à l'électrification comporte un coût d'opportunité en ce sens qu'il pourrait autrement servir à appuyer l'offre en transports collectifs et actifs.

#### 2.1.13.2 Objectifs

Figurant parmi les juridictions les plus aisées, le Québec se doit de faire preuve d'exemplarité dans ses engagements, mais également dans les résultats qu'il obtient subséquemment. Le projet de recherche vise ainsi trois objectifs : (1) évaluer le degré d'exemplarité des cibles du Québec en matière d'électrification des autobus urbains vis-à-vis de la communauté internationale; (2) évaluer le potentiel de réduction des émissions de GES associé à ces cibles; (3) évaluer dans quelle mesure ces cibles contribuent par ailleurs à l'atteinte d'autres objectifs de développement durable. Les documents-cadres (ex. politique de mobilité durable, stratégie d'électrification, rapports annuels) des différentes juridictions (pays, région, ville et/ou société de transport) ont été analysés afin de répertorier les cibles, évaluer l'avancement des acquisitions et positionner l'importance de l'électrification au sein des stratégies publiques de décarbonation.

#### 2.1.13.3 Méthodologie

La sélection des juridictions a été effectuée sur la base de différents critères, soit (1) des juridictions disposant d'un statut socio-économique comparable au Québec; (2) ET issues d'une variété de zones géographiques; (3) ET lauréates d'un prix ou ayant été citées dans le cadre d'un exercice d'étalonnage ou de comparaison internationale ou dans un palmarès; (4) OU présentant des caractéristiques similaires aux grandes villes québécoises en ce qui a trait (i) à la taille du parc d'autobus, (ii) à la présence d'un contexte hivernal ou (iii) d'un taux de motorisation élevé. L'échantillon final ne comprend ainsi pas uniquement des juridictions championnes de l'électrification, mais plus largement des juridictions qui ont des caractéristiques comparables aux grandes villes du Québec qui disposent d'une société de transport et qui sont amenées à prendre des actions en matière d'électrification. La sélection finale comprend six villes de l'Amérique du Nord (Vancouver, Winnipeg, Calgary, Edmonton, New York et Los Angeles), deux de l'Océanie (Sydney et Auckland), cinq de l'Europe de l'Ouest (Berlin, Paris, Rotterdam, Londres et Copenhague), quatre de l'Europe du Nord (Turku, Stockholm, Oslo et Reykjavik) ainsi que deux de l'Europe du Sud (Madrid et Cagliari). Malgré leur avant-gardisme, aucune ville chinoise n'a été retenue, leurs caractéristiques étant jugées trop éloignées de celles des villes québécoises.

#### 2.1.13.4 Résultats

##### Exemplarité des cibles

Tous les pays de l'échantillon ont des objectifs de réduction des émissions de GES à l'horizon 2030 ainsi qu'un objectif de relative carboneutralité aux environs de 2050. Les cibles semblent pour la plupart motivées par les grandes rencontres internationales (ex. ZEV Alliance, C40, *Carbon neutral cities*, COP) plutôt que par une évaluation minutieuse de la faisabilité et de l'efficacité des moyens à leur disposition. De manière générale, les gouvernements semblent se fixer des cibles ambitieuses, comme la carboneutralité, sans être certain de la manière dont ils vont y parvenir. Dans bien des juridictions, la réflexion sur les moyens requis pour atteindre concrètement les cibles ne semble pas en effet complète. Malgré la croissance des émissions de GES en transport, très peu de juridictions semblent s'être dotées d'une cible de réduction spécifique pour ce

secteur. Le Québec, avec sa Politique de mobilité durable et son objectif de réduction des émissions de 37,5 % en transport à l'horizon 2030, semble faire preuve d'une relative exemplarité.

Les stratégies classiques de décarbonation peuvent être résumées par l'approche « Réduire-Transférer-Améliorer ». Dans la catégorie « Améliorer », la quasi-totalité des juridictions ont des cibles d'électrification pour les véhicules publics. Il en va autrement pour la catégorie « Transfert ». Seulement la moitié des juridictions ont des cibles claires pour les transports collectifs et actifs. Ces cibles sont par ailleurs basées sur une très grande variété d'indicateurs qui ne sont pas équivalents (ex. augmentation de la part modale vs augmentation de l'achalandage du TC). La manière de mesurer la contribution du transport en commun dans la lutte aux changements climatiques n'apparaît ainsi pas faire consensus à l'échelle internationale.

En matière d'électrification des autobus urbain, les juridictions ont typiquement une date butoir à partir de laquelle les nouvelles acquisitions seront limitées à des véhicules à zéro ou à faibles émissions ainsi qu'une date butoir pour la conversion complète des parcs de véhicules en circulation (Figure 2-34). Bien que le Québec soit une des seules juridictions à s'être doté d'une cible intermédiaire (55 % en 2030), les cibles du Québec ressortent comme étant similaires à celles des autres juridictions. On peut ainsi conclure que le Québec fait preuve d'exemplarité.

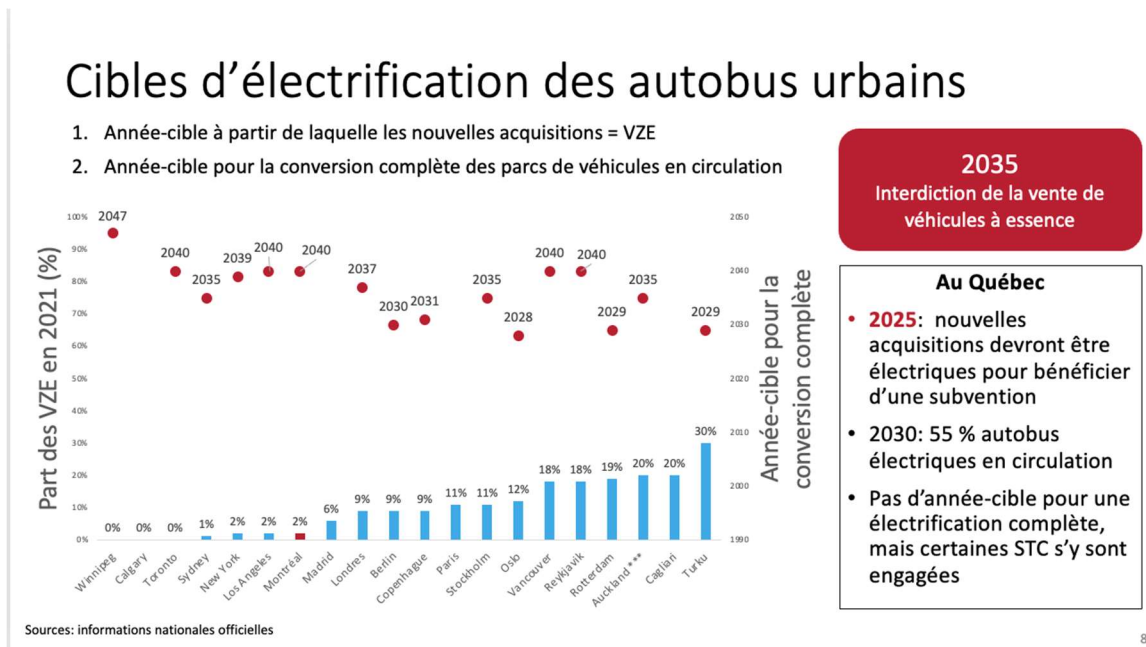


Figure 2-34 Synthèse des cibles (Sources : voir rapport complet pour l'ensemble des références)

#### Potentiel de réduction des émissions de GES

Selon nos estimations, les autobus urbains émettraient environ 0,3 % des émissions de GES au Québec (Figure 2-35) et en moyenne 0,2 % dans les autres juridictions étudiées (Figure 2-36). Ce pourcentage correspond au gain environnemental qui résulterait de l'électrification complète des parcs d'autobus en circulation. S'il en va de la responsabilité sociale des organismes publics de tenir un rôle positif en matière de développement durable, la teneur de cette action en matière de lutte aux changements climatiques est peu contributive et joue surtout un rôle symbolique. En l'absence des sociétés de transport, les individus n'auraient d'autre choix que d'utiliser un véhicule privé et les émissions de GES en transport seraient de 18 % à 30 % plus élevées selon les estimations recensées. Le transfert modal vers les transports collectifs et actifs est donc une



stratégie plus efficace que l'électrification des autobus pour lutter contre les changements climatiques.

## Potentiel de réduction des GES en 2019 = 0,3 %

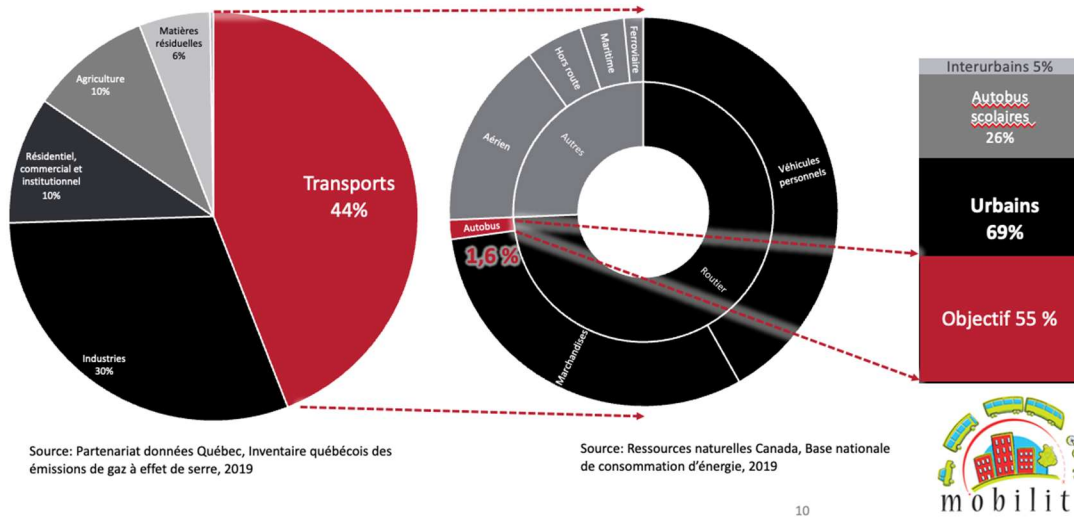


Figure 2-35 Calcul de la contribution de l'électrification de 55 % des autobus urbains à la réduction des émissions de GES au Québec (Sources : Québec, Inventaire Québécois des émissions de gaz à effet de serre et Ressources naturelles Canada, Base nationale de consommation d'énergie)

## Potentiel dans les villes étudiées en 2019

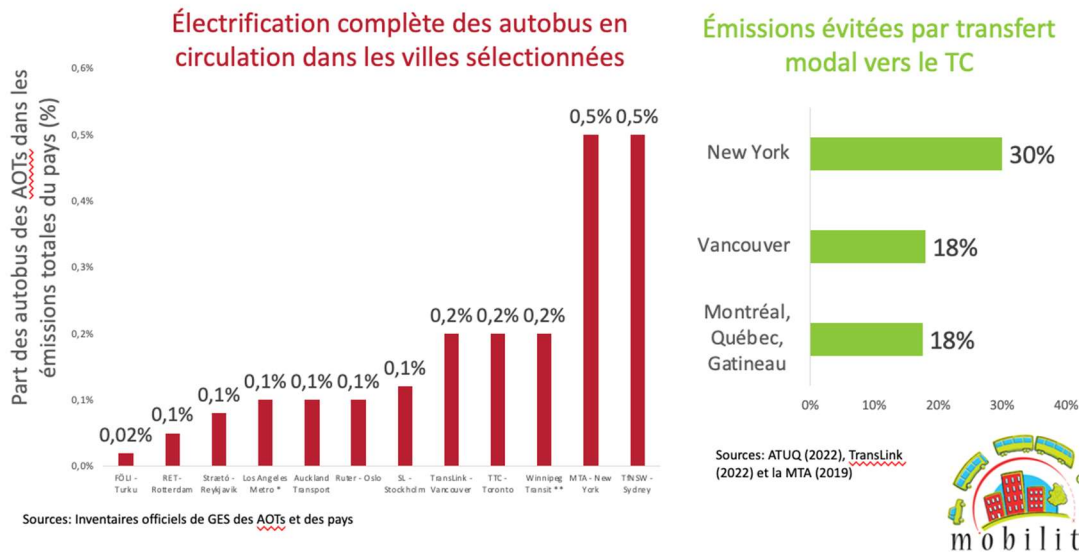


Figure 2-36 Calcul de la contribution de l'électrification de 55 % des autobus urbains à la réduction des émissions de GES ailleurs dans le monde et contribution relative du transfert modal (Sources : données nationales, voir rapport complet pour l'ensemble des références)

### Potentiel de contribution à d'autres cibles collectives

Une synthèse de connaissances sur l'électrification des transports en commun conclut que l'acquisition d'autobus zéro émission est plus fructueuse lorsqu'elle s'inscrit dans des plans visant à offrir un accès équivalent ou amélioré aux usagers, permettant ainsi de réduire le nombre de véhicules sur les routes et leurs désagréments (Diamond et al., 2021). Notre revue des écrits et des motivations des juridictions conduit à une conclusion similaire. Au regard des catégories de bénéfices étudiées, le transfert modal de l'automobile vers le transport en commun apparaît pouvoir générer des bénéfices plus significatifs pour la société dans son ensemble que l'électrification d'autobus existants (Figure 2-37). La dimension sociale est notamment entièrement exclue de la réflexion sur l'électrification. Les autobus zéro émission peuvent néanmoins générer des bénéfices localisés importants pour les riverains, notamment une réduction de la pollution atmosphérique et sonore.

## Bénéfices des dépenses publiques

	Environnement		Société			Économie			
	GES	Pollution autres formes	Sédentarité physique	Inclusion sociale	Sécurité routière	Diminution de la dépendance aux énergies fossiles	Productivité (congestion, densification foncière)	Diminution des dépenses des ménages	PIB et emplois
Électrifier les autobus existants	✓	✓				✓			✓
Accroître l'offre de transport en commun	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Figure 2-37 Évaluation qualitative des bénéfices sociaux associés à l'électrification des autobus et à une augmentation de l'offre de transport en commun (Sources : Diamond et al. (2021) et analyse des motivations des juridictions, voir rapport complet pour l'ensemble des références)

### 2.1.13.5 Conclusions

Les ressources consacrées à l'électrification des autobus comportent un coût d'opportunité élevé, car ces ressources pourraient autrement être utilisées pour soutenir l'offre de transport collectif et actif. Les sociétés de transport du Québec, comme ailleurs dans le monde, sont toujours confrontées à un imposant déficit d'exploitation en raison de la pandémie et d'un manque à gagner chronique. Les diminutions de services prévues pourraient impacter encore davantage la demande pour le TC à long terme et empêcher le Québec d'atteindre ses cibles de réduction des émissions de GES.

## 2.1.14 Perspectives sur le potentiel du VAÉ

Par : Jean-Simon Bourdeau, professionnel de recherche

### 2.1.14.1 Introduction

Le vélo à assistance électrique (VAÉ) est un vélo dont le moteur ne peut fonctionner que lorsque le cycliste actionne les pédales (OQLF). Équiterre a obtenu un financement pour réaliser une campagne de promotion sur le VAÉ nommée Vélovolt. Vélovolt est une campagne d'essais, de recherche et de promotion qui vise à augmenter la part modale du transport actif et plus spécifiquement du vélo à assistance électrique (VAE) auprès des navetteurs et navetteuses et, ultimement, de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) liées aux déplacements utilitaires (Équiterre). Dans le cadre de la campagne Vélovolt, l'équipe de la Chaire mobilité a été sollicitée afin de notamment développer une enquête pré et post essai auprès des participants de Vélovolt.

### 2.1.14.2 Méthodologie et données

Afin d'évaluer le potentiel du VAÉ, les données de Vélovolt sont mises à contribution. Les participants de Vélovolt font l'essai d'un VAÉ pendant une période de deux à quatre semaines. Ceux-ci sont invités à remplir un questionnaire avant le début de leur essai et après la fin de leur essai. Le questionnaire est composé de cinq sections : Domicile, Ménage, Profil, Lieux Visités et Perceptions. Les quatre premières sections du questionnaire étaient identiques dans les versions pré et post-essai. La version post-essai contenait une série de questions supplémentaires dans la section Perceptions. Les données qui sont présentées dans cette section sont celles en date du 5 juin 2023. Il s'agit des questions de perceptions posées dans le cadre de l'enquête pré et post essai de Vélovolt. Au moment d'amorcer l'analyse, quelque 20 organisations participaient au projet.

### 2.1.14.3 Résultats

Le premier résultat pertinent pour le potentiel du VAÉ concerne les freins à l'utilisation du vélo et du VAÉ pour se rendre au lieu de travail. La Figure 2-38 montre les freins identifiés par les participants avant de faire leur essai de VAÉ. Il est à noter que les participants pouvaient identifier plusieurs freins. En ce qui concerne le VAÉ, les principaux freins sont la peur du vol du vélo ainsi que la nécessité de raccompagner quelqu'un. Il est également intéressant de noter qu'environ le tiers des répondants n'ont identifié aucun frein au VAÉ, alors que pour le vélo régulier c'est un peu moins d'un répondant sur six qui n'a identifié aucun frein.

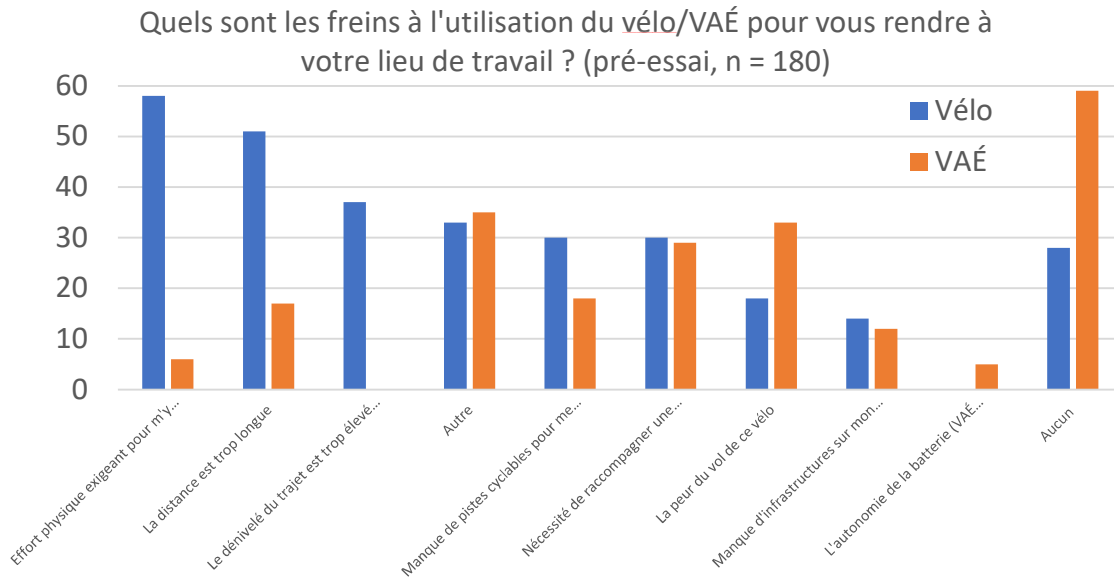


Figure 2-38 Freins à l'utilisation du vélo/VAÉ pour se rendre au lieu de travail

Une fois les freins à l'utilisation du VAÉ identifiés, les répondants étaient invités à répondre à deux questions sur l'attractivité du VAÉ comparativement au vélo régulier et aux autres modes. En ce qui concerne le vélo régulier (Figure 2-39), les principales raisons évoquées sont la réduction du temps de déplacement et moins d'effort physique. En ce qui concerne l'attractivité du VAÉ comparativement aux autres modes (Figure 2-40), les deux principales raisons évoquées sont l'exercice physique et l'environnement.

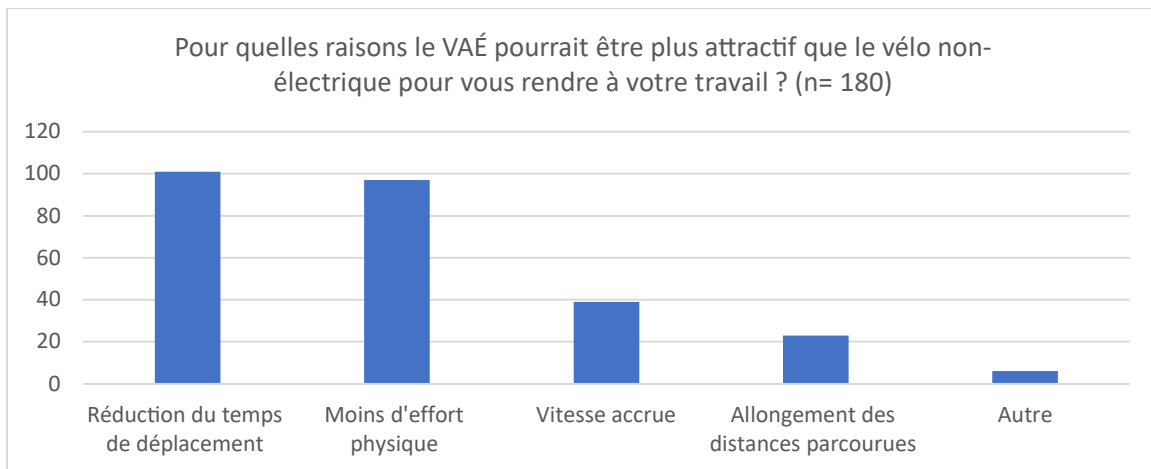


Figure 2-39. Raisons pour lesquelles le VAÉ pourrait être plus attractif que le vélo non-électrique pour se rendre au lieu de travail

Pour quelles raisons le VAÉ pourrait être plus attractif que d'autres modes de transport pour vous rendre à votre travail (excluant le vélo)? (n = 180)

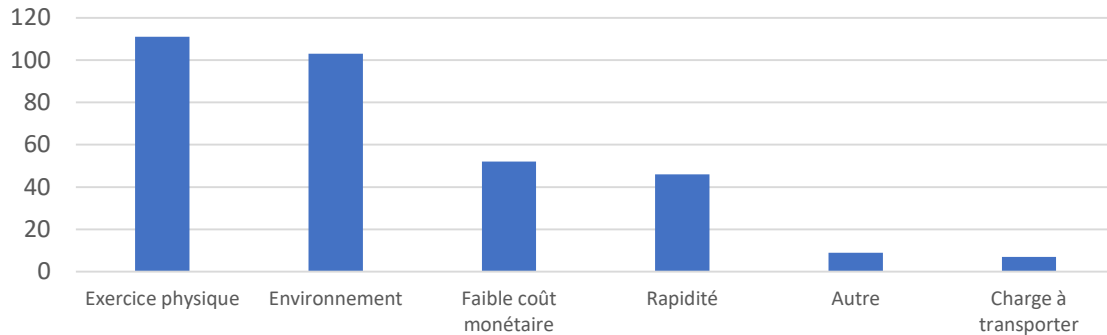


Figure 2-40. Raisons pour lesquelles le VAÉ pourrait être plus attractif que d'autres modes de transport pour se rendre au lieu de travail (excluant le vélo)

Étant donné que les participants ont été recrutés par l'employeur à titre d'organisation participante, une question de perception est posée sur les moyens que l'employeur peut mettre en place afin de favoriser l'utilisation du VAÉ. La Figure 2-41 montre les réponses obtenues. Le principal moyen identifié par les participants est la disponibilité de vélos en libre-service (VLS) offerts par l'employeur.

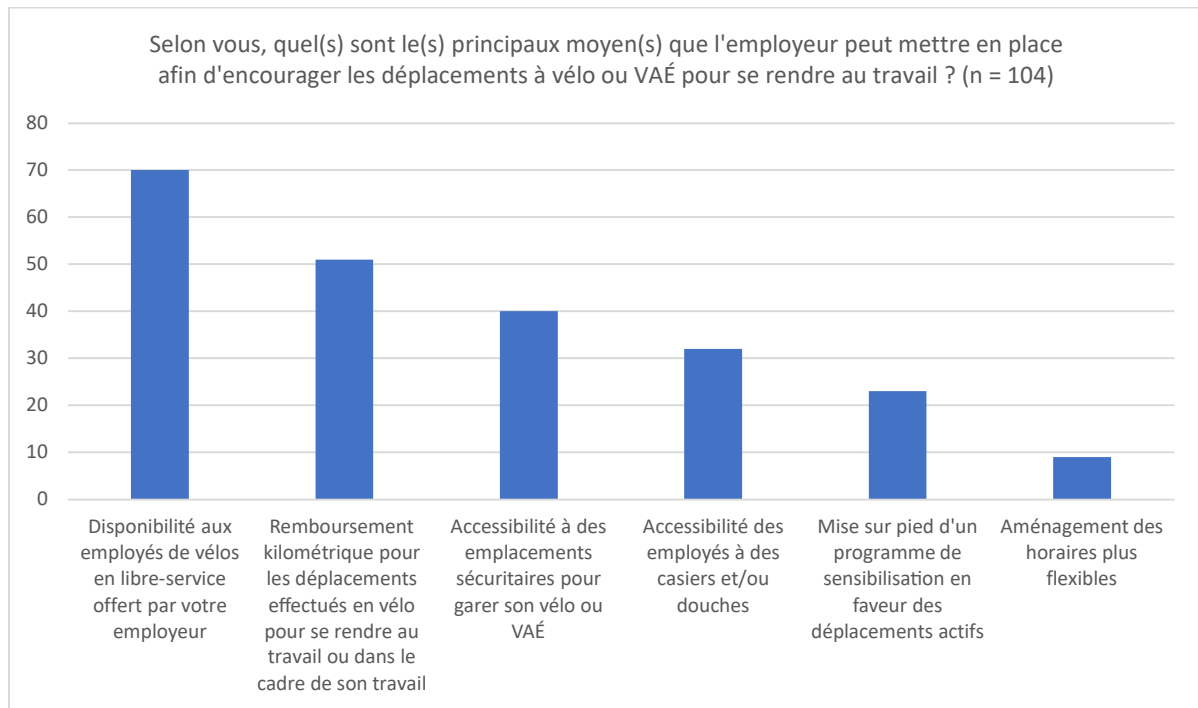


Figure 2-41. Principaux moyens que l'employeur peut mettre en place afin d'encourager les déplacements à vélo ou en VAÉ pour se rendre au travail

En ce qui concerne la municipalité et le gouvernement, les principaux incitatifs souhaités par les participants sont montrés à la Figure 2-42. Les réponses les plus fréquentes sont une subvention

à l'achat d'un VAÉ ainsi qu'une augmentation du nombre de pistes cyclables et de la connectivité entre elles.

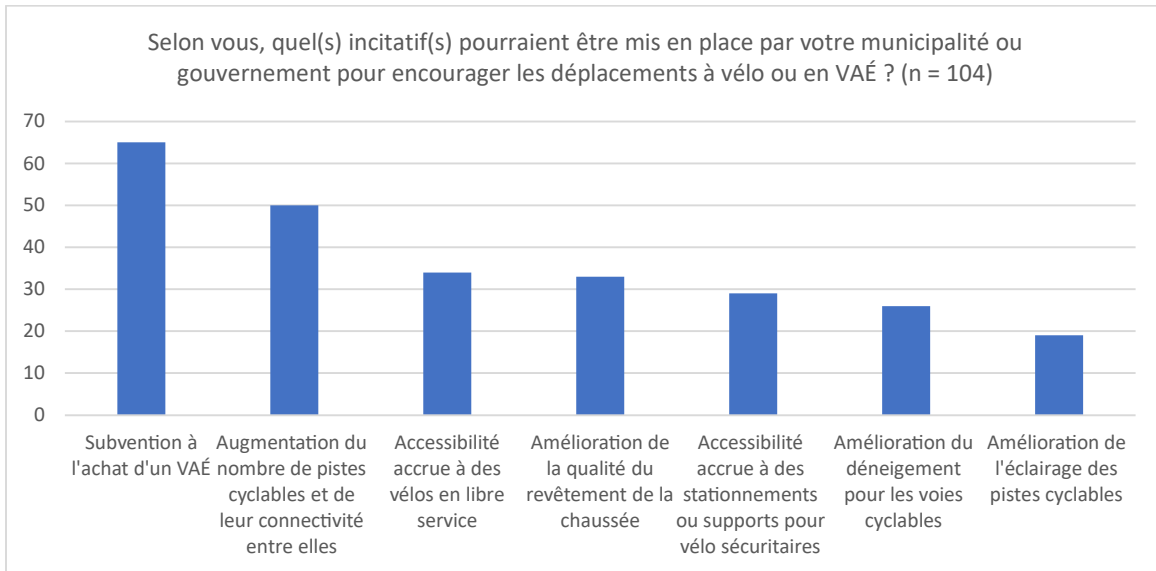


Figure 2-42. Incitatif(s) que la municipalité ou le gouvernement pourraient mettre en place pour encourager les déplacements à vélo ou en VAÉ

La Figure 2-43 montre les intentions d'achat pré et post essai des participants de Vélovolt. Il est possible de constater que les indécis (ceux ayant répondu peut-être) ont grandement diminué à la suite des essais.

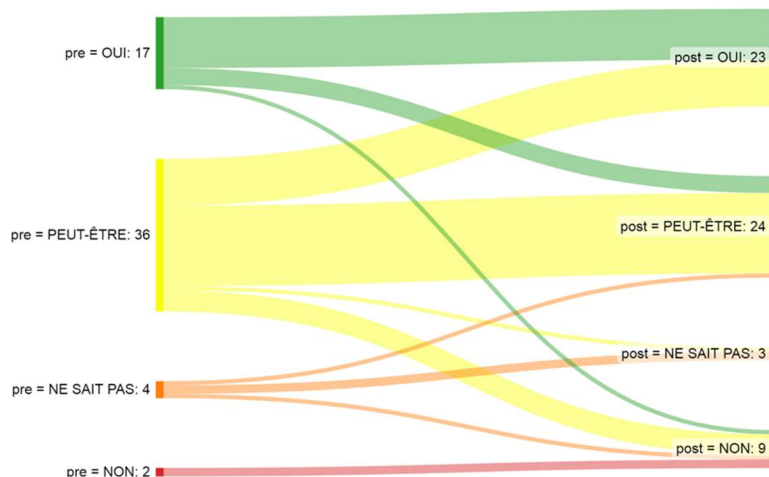


Figure 2-43. Intentions d'achat pré et post essai

La Figure 2-44 montre quant à elle l'horizon temporel pour l'achat d'un VAÉ pour ceux ayant répondu avoir l'intention de s'acheter un VAÉ après l'essai d'un VAÉ. La plupart des répondants ont indiqué vouloir s'acheter un VAÉ dans un horizon temporel de deux ans ou moins.

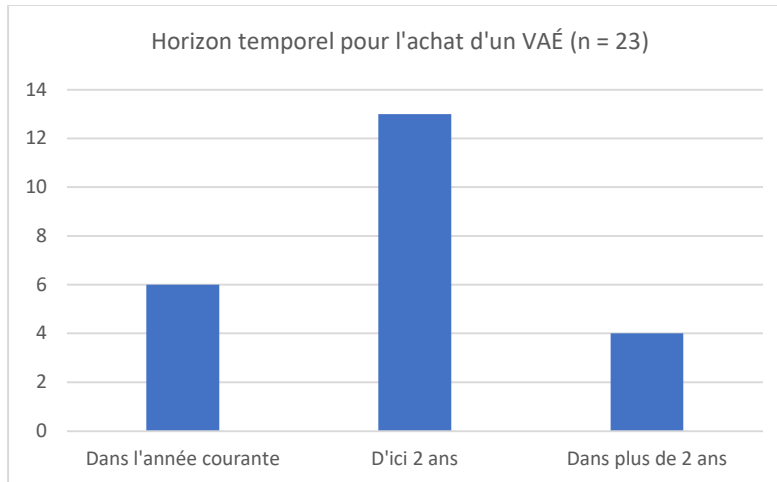


Figure 2-44 Horizon temporel pour l'achat d'un VAÉ

#### 2.1.14.4 Conclusion

Les questions de perception dans l'enquête de Vélovolt ont permis d'établir plusieurs constats sur les freins à l'utilisation du VAÉ, sur l'attractivité du VAÉ ainsi qu'aux incitatifs qui pourraient être mis en place afin de favoriser la pratique du VAÉ. En ce qui concerne les freins à l'utilisation du VAÉ, le principal frein identifié par les participants est la peur du vol du VAÉ. Ainsi, les employeurs, municipalités et gouvernements pourraient améliorer la sécurité des infrastructures de stationnement à vélo sur les sites leur appartenant afin de diminuer ce frein. Les répondants de Vélovolt ont répondu que les raisons de l'attractivité du VAÉ par rapport au vélo sont une réduction des temps de déplacement et de l'effort physique, alors que les raisons de l'attractivité du VAÉ par rapport aux autres modes sont l'exercice physique et l'environnement. La conclusion de ces réponses serait que le VAÉ favorise l'exercice physique mais que contrairement au vélo non-électrique ce n'est pas un frein.

En ce qui concerne l'essai d'un VAÉ, les résultats préliminaires de Vélovolt démontrent que faire l'essai d'un VAÉ durant une période de quelques semaines diminue l'incertitude quant aux intentions d'achats. Bien que certains indécis le soient toujours à la suite des essais, la majorité de ceux qui ne sont plus indécis ont indiqué avoir l'intention de s'acheter un VAÉ ultérieurement. Également, un petit nombre de participants ne souhaitaient pas se procurer un VAÉ avant leur essai et ceux-ci n'ont pas changé d'idée à la suite de leur essai.

Finalement, les employeurs, les municipalités et les gouvernements ont leur rôle à jouer dans l'utilisation du VAÉ comme mode de transport utilitaire. Pour les employeurs, les principaux incitatifs identifiés par les participants sont la disponibilité de vélos en libre-service sur leur lieu d'emploi et un remboursement kilométrique. Pour les municipalités et gouvernements, les principaux incitatifs identifiés par les participants sont des subventions à l'achat d'un VAÉ et une augmentation du nombre de pistes cyclables.



## 3 Rayonnement

Les activités de l'année 2023 de l'équipe de la Chaire Mobilité sont listées ci-dessous.

### 3.1 Publications (2023)

- Deschaintres, E., Morency, C., Trépanier, M. (2023). Développement d'indicateurs de mesure de la variabilité d'utilisation du transport en commun à partir de données de cartes à puce, *Les Cahiers Scientifiques du Transport-Scientific Papers in Transportation*, Volume 76.
- Morency, C., Verreault, H. (2023). *Measuring Travel Behavior, Handbook on Transport and Land Use: A Holistic Approach in an Age of Rapid Technological Change*, Edward Elgar Publishing, p.168.
- Deschaintres, E., Morency, C., Trépanier, M. (2023). Modeling interactions between the Montreal subway and other urban transportation modes at the station level, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 136, p.105079.
- Verreault, H., Morency, C. (2023). Methodology to Add Value to Ageing Travel Survey Data, *Transportation Research Record*, Volume 2677, Issue 9.
- Arefin Khan, N, Morency, C. (2023). Investigating Anticipated Changes in Post-Pandemic Travel Behavior: Latent Segmentation-Based Logit Modeling Approach Using Data From COVID-19 Era, *Transportation Research Record*, Online First.
- Yarahmadi, A., Morency, C., Trépanier, M. (2023). New data-driven approach to generate typologies of road segments, *Transportmetrica A: Transport Science*, pp.1-24

### 3.2 Principales participations à des congrès

#### 3.2.1 Congrès annuel du Transportation Research Board 2023 (Washington DC)

Verreault, H., Morency, C. (2023). Methodology to Add Value to Ageing Travel Survey Data, presented at the 102<sup>th</sup> annual meeting of the Transportation Research Board.

#### 3.2.2 Congrès annuel de l'AQTR 2023 (Québec)

- Wang, Y., Morency, C., Trépanier, M. (2023). Fluctuations spatio-temporelles des temps de déplacement en bus.
- Morency, C. (2023). Et si votre bus passait aux 10 minutes?
- Malekzadeh, H., Morency, C. (2023) Scénarios Plausibles de Mobilité dans un Monde Post-COVID.
- Garnier, C., Trépanier, M., Morency, C. (2023). Persistance des impacts de la COVID-19 sur les comportements de mobilité des usagers du transport adapté à Montréal.
- Yarahmadi, A., Morency, C., Trépanier, M. (2023). POSTER ÉTUDIANT : Nombre optimal de cycles de conduite pour améliorer l'estimation des émissions des véhicules.
- Savard, É., Trépanier, M., Morency, C. (2023). Les habitudes de mobilité des usagers de l'autopartage ont-elles changé à travers les différentes phases de la pandémie?
- Lavolette, J., Morency, C., Waygood, O. (2023). Types de quartier et attitudes face à l'auto, quels effets sur les choix de mobilité ?
- Keshavarz, H., Morency, C. (2023). POSTER ÉTUDIANT : Qu'est-ce qui pousse les gens à abandonner les enquêtes Web?
- Chekir, E., Morency, C. (2023). Mieux évaluer la qualité de l'accès à pied aux stations de métro.

#### 3.2.3 Canadian Transport Research Forum 2023 (Toronto)

Wang, Y., Morency, C., Trépanier, M. (2023). Evaluating transit reliability issues: Comparing travel time and travel speed approaches.

Rezvani, K., Morency, C. (2023). A systematic vulnerability analysis: comparing the impact of random and targeted disruptions in urban metro networks.

Malekzadeh, H. (2023). Investigating prospective travel behavior of individuals using a pseudo-panel approach.

Morency, C., Verreault, H., Bourdeau, J-S (2023). Understanding the interactions between taxi and transit: The case of Montreal.

#### 3.2.4 5<sup>e</sup> Rencontres francophones transport mobilité 2023 – Dijon (France)

Savard, É., Trépanier, M., Morency, C. (2023). Analyse spatio-temporelle des types de réservations d'autopartage à Montréal

Morency, C., Bourdeau, J-S. (2023). Compétitivité et complémentarité entre le transport en commun et le taxi

#### 3.2.5 World Conference on Transport Research 2023 (Montréal)

Zanolini, M., Morency, C. (2023). Analyzing the characteristics of the residential relocation phenomenon through the willingness of households to move.

Yarahmadi, A., Morency, C., Trépanier, M. (2023). Identifying Optimal Sets of Driving Cycles in Different Driving Conditions Using Machine Learning.

Rezvani, K., Morency, C. (2023). A New Failure Strategy to Enhance the Vulnerability Assessment of Urban Metro Networks

Morency, C. (2023) – Participation à une session spéciale sur le projet Mobilizing Justice

Wang, Y., Morency, C., Trépanier, M. (2023). Systemwide Variations and Factors Affecting Mixture Transit Travel Time Distributions

Lacombe, M., Boukelouha, R. (2023). Lessons from COVID-19 for tomorrow's cities: comparing scenarios improving the distribution of local opportunities.

Keshavarz, H. (2023). An overview of methods for measuring respondent burden in surveys.

Malekzadeh, H., Morency, C. (2023). How will individuals travel post-COVID? A statistical framework to identify the determinants of different travel behaviors.

Chekir, E. (2023). How Good is Active Accessibility to Subway Stations in Montreal?

Bourdeau, J.-S., Morency, C. (2023). Spatial and Energy footprints of Cars in Cities: New Metrics and Illustrations for the Montreal Area.

De Rolland, C., Morency, C., Bourdeau, J.-S. (2023). Developing a route calculator for E-bikes based on GPS data.

Poirier, C., Morency, C. (2023). Assessing the Quality and Diversity of Transit Route Options.

De Souza, D., Boukelouha, R., Frejinger, E., Morency, C., Mousseau, N., Trépanier, M. (2023). A review of methods and models to assist in the design of national strategies and policies to reduce greenhouse gas emissions.

Morency, C., Trépanier, M., Bastien, G., Bourbonnais, P.L., Brosseau, Y. (2023). Organisation d'une session spéciale sur Transition: an open-source platform for transit network design and simulations.

Lavolette, J., Waygood, O., Morency, C. (2023). Car ownership, carsharing, neighbourhood types and travel attitudes: a latent-cluster analysis.

Garnier, C., Trépanier, M., Morency, C. (2023). Analyzing Mobility Gaps Between People with and without Disabilities using Oaxaca-Blinder Decomposition Method.

### 3.2.6 Autres

Organisation d'un colloque (La recherche collaborative France-Québec comme levier de la transition durable des transports) lors des Entretiens du Centre Jacques Cartier à Lyon, octobre 2023 et présentations par C. Morency et J.-S. Bourdeau

Organisation d'un colloque lors du 90e congrès de l'ACFAS (Défis de la modélisation de la demande de transport dans un monde post-COVID)

Présentation de C. Morency au Sommet EVO 2023 (<http://www.creddo.ca/sommet-evo-2023>)

Intervention de C. Morency lors de la causerie sur la qualité de l'air organisée au Coeur des Sciences: <https://tv.uqam.ca/causerie-qualite-lair-inspirez-expirez?cat=180>

Réalisation de 15 chroniques radio à l'émission "Le Québec Maintenant" avec Patrick Lagacé.

Présentation du logiciel de planification de transport collectif Transition, par Yannick Brosseau, aux conférences de logiciels libres FOSDEM 2023 (Bruxelles, février 2023) et SCaLE20x (Pasadena, mars 2023).

Webinaire public pour présenter le logiciel Transition, octobre 2023

## 4 Références

Adams, G., & Gerard, D. (2000). Smart growth and transportation: Opportunities and challenges for Austin. Institute of Transportation Engineers. ITE Journal, 70(11), 30.

Aemmer, Z., A. Ranjbari, and D. MacKenzie, Measurement and classification of transit delays using GTFS-RT data. Public Transport, Vol. 14, No. 2, 2022, pp. 263–285.

Alahyari Fard, F. (2022). Spatio-temporal modeling of taxi trips. Polytechnique Montréal.

Alencar, V. A., Pessamilio, L. R., Rooke, F., Bernardino, H. S., & Borges Vieira, A. (2021). Forecasting the carsharing service demand using uni and multivariable models. Journal of Internet Services and Applications, 12(1), 1-20.

Aminikhanghahi, S., & Cook, D. J. (2017). A survey of methods for time series change point detection. Knowledge and Information Systems, 51(2), 339-367. <https://doi.org/10.1007/s10115-016-0987-z>

Amoaning-Yankson, S., & Amekudzi-Kennedy, A. (2017). Transportation System Resilience: Opportunities to Expand from Principally Technical to Sociotechnical Approaches. 2604(1), 28-36. doi:10.3141/2604-04

An, Z., Heinen, E., & Watling, D. (2023). The level and determinants of multimodal travel behavior: Does trip purpose make a difference? International Journal of Sustainable Transportation, 17(2), 103-117. doi:10.1080/15568318.2021.1985195

Anderson, P., Owen, A., Levinson, D., 2012. The time between: continuously-defined accessibility functions for schedule-based transportation systems. Paper Presented at the 92nd Annual Meeting of the Transportation Research Board.

Arslan Asim, M., A. Weiss, L. Kattan et S. Wirasinghe (2021). « Comportement de choix de mode des usagers du transport en commun pendant l'interruption de service planifiée à court terme du train léger. » Dossier de recherche sur les transports 2675(10): 711-722.

ATUQ, 2010. La contribution des sociétés de transport en commun au développement durable.

ATUQ, 2022a. Quantification des émissions de gaz à effet de serre évitées par le transport collectif dans les régions métropolitaines des villes de Gatineau et de Québec-Lévis [WWW Document]. Association du transport urbain du Québec (ATUQ). URL <https://atuq.com/fr/quantification-des-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-evitees-par-le-transport-collectif-dans-les-regions-metropolitaines-des-villes-de-gatineau-et-de-quebec-levis/> (accessed 11.21.22). ATUQ, 2019. Étude d'impacts économiques du transport en commun.

Basbas, S., Campisi, T., Georgiadis, G., Al-Rashid, M. A., & Tesoriere, G. (2021). COVID-19 and public transport demand trends in Sicily: Analyzing external factors and governmental recommendations. Eur. Transp. Trasp. Eur, 83(9).

Beaudoin, J., & Lin Lawell, C. Y. C. (2018). The effects of public transit supply on the demand for automobile travel. Journal of Environmental Economics and Management, 88, 447-467. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2018.01.007>

Beetham, J., Ivory, V. C., Thomas, J., Kortegast, P., Cooper, D., Burton, J., Bowie, C., Malde, L., & Moore, C. (2021). Latent demand for walking and cycling. Waka Kotahi= NZ Transport Agency.

- Bellemans, T., Van Bladel, K., Janssens, D., Wets, G., & Timmermans, H. J. (2009). Measuring and Estimating Suppressed Travel with Enhanced Activity–Travel Diaries. *Transportation Research Record*, 2105(1), 57-63.
- Benenson, I., Martens, K., Rofé, Y., & Kwartler, A. (2011). Public transport versus private car GIS-based estimation of accessibility applied to the Tel Aviv metropolitan area. *The Annals of Regional Science*, 47(3), 499–515. <https://doi.org/10.1007/s00168-010-0392-6>.
- Bian, Z., Zuo, F., Gao, J., Chen, Y., Pavuluri Venkata, S. S. C., Duran Bernardes, S., Ozbay, K., Ban, X., & Wang, J. (2021). Time lag effects of COVID-19 policies on transportation systems: A comparative study of New York City and Seattle. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 145, 269-283. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.01.019>
- Blázquez-García, A., Conde, A., Mori, U., & Lozano, J. A. (2021). A Review on Outlier/Anomaly Detection in Time Series Data. *ACM Comput. Surv.*, 54(3), Article 56. <https://doi.org/10.1145/3444690>
- Bosc, M., Heitz, F., Armspach, J.-P., Namer, I., Gounot, D., & Rumbach, L. (2003). Automatic change detection in multimodal serial MRI: application to multiple sclerosis lesion evolution. *NeuroImage*, 20(2), 643-656.
- Bourbonnais, P.-L., & Morency, C. (2013). Web-based travel survey: a demo. In *Transport survey methods: best practice for decision making*. Emerald Group Publishing Limited.
- Box, G. E., & Jenkins, G. M. (1976). *Time series analysis, control, and forecasting*. San Francisco, CA: Holden Day, 3226(3228), 10.
- Box, G. E., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015). *Time series analysis: forecasting and control*. John Wiley & Sons.
- Brahim-Belhouari, S., & Bermak, A. (2004). Gaussian process for nonstationary time series prediction. *Computational Statistics & Data Analysis*, 47(4), 705-712.
- Bravi, A., Longtin, A., & Seely, A. J. (2011). Review and classification of variability analysis techniques with clinical applications. *Biomedical engineering online*, 10, 1-27.
- Brillinger, D. R. (2001). *Time series: data analysis and theory*. SIAM.
- Bucsky, P. (2020). Modal share changes due to COVID-19: The case of Budapest. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 8, 100141.
- Buehler, R., & Pucher, J. (2021). COVID-19 impacts on cycling, 2019–2020. *Transport Reviews*, 41(4), 393-400.
- Bullock, D., Brereton, F., & Bailey, S. (2017). Integrated transport strategies for provision of modal choices in urban Ireland. *Transport Policy*, 53, 46-56.
- Cao, X., Mokhtarian, P. L., & Handy, S. L. (2009). Examining the impacts of residential self-selection on travel behaviour: A focus on methodologies. *Transportation Research Part B: Methodological*, 43(3), 204-223.
- Carrel, A., A. Halvorsen, and J. L. Walker, Passengers' perception of and behavioral adaptation to unreliability in public transportation. *Transportation Research Record*, Vol. 2351, No. 1, 2013, pp. 153–162.

- Castanedo, F. (2013) "A Review of Data Fusion Techniques," *Sci. World J.*, vol. 2013, p. e704504, Oct. 2013, doi: 10.1155/2013/704504.
- Caulfield, B., Rock, S. et Ahern, A. (2014). Equity and Fairness in Transport Planning: The State of Play, 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC.
- Chen, X., & Jiang, H. (2022). Detecting the Demand Changes of Bike Sharing: A Bayesian Hierarchical Approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(5), 3969-3984. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3037791>
- Chen, X., Z. Cheng, J. G. Jin, M. Trepanier, and L. Sun, Probabilistic forecasting of bus travel time with a Bayesian Gaussian mixture model. arXiv preprint arXiv:2206.06915, 2022.
- Cheng, H., Tan, P.-N., Potter, C., & Klooster, S. (2009). Detection and characterization of anomalies in multivariate time series. *Proceedings of the 2009 SIAM international conference on data mining*.
- CityTransit. (2022). « Métro à Montréal » de <https://citytransit.uitp.org/montreal/collective-shared-mobility-options/metro>.
- Ciuffini, F., Tengattini, S., & Bigazzi, A. Y. (2023). Mitigating increased driving after the COVID-19 pandemic: an analysis on mode share, travel demand, and public transport capacity. *Transportation Research Record*, 2677(4), 154-167.
- Clifton, K. J., & Moura, F. (2017). Conceptual framework for understanding latent demand: Accounting for unrealized activities and travel. *Transportation Research Record*, 2668(1), 78-83.
- Coelho, D., Costa, D., Rocha, E. M., Almeida, D., & Santos, J. P. (2022). Predictive maintenance on sensorized stamping presses by time series segmentation, anomaly detection, and classification algorithms. *Procedia computer science*, 200, 1184-1193. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.318>
- Cohen, A. (2020). Considerations for social distancing on public transportation during the Covid-19 recovery. *Mineta Transportation Institute, San Jose, CA*.
- Conway, M. W., Salon, D., da Silva, D. C., & Mirtich, L. (2020). How will the COVID-19 pandemic affect the future of urban life? Early evidence from highly-educated respondents in the United States. *Urban Science*, 4(4), 50.
- Cortés, C. E., J. Gibson, A. Gschwender, M. Munizaga, and M. Zúñiga, Commercial bus speed diagnosis based on GPS-monitored data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 19, No. 4, 2011, pp. 695–707
- Costa, C. S., Pitombo, C. S., & Souza, F. L. U. d. (2022). Travel Behavior before and during the COVID-19 Pandemic in Brazil: Mobility Changes and Transport Policies for a Sustainable Transportation System in the Post-Pandemic Period. *Sustainability*, 14(8), 4573. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/8/4573>
- Cryer, J. D. (1986). *Time series analysis* (Vol. 286). Duxbury Press Boston.
- Currie, G., Jain, T., & Aston, L. (2021). Evidence of a post-COVID change in travel behaviour—Self-reported expectations of commuting in Melbourne. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 153, 218-234.

- Dai, D., & Wang, F. (2011). Geographic disparities in accessibility to food stores in southwest Mississippi. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 38(4), 659–677. <https://doi.org/10.1068/b36149>.
- Dalvi, M. Q. and K. M. Martin (1976). "The measurement of accessibility: Some preliminary results." *Transportation* 5(1): 17-42.
- Das, S., Boruah, A., Banerjee, A., Raoniar, R., Nama, S., & Maurya, A. K. (2021). Impact of COVID-19: A radical modal shift from public to private transport mode. *Transport Policy*, 109, 1-11.
- Dasarathy, B. V. (1997) "Sensor fusion potential exploitation-innovative architectures and illustrative applications," *Proc. IEEE*, vol. 85, no. 1, pp. 24–38, Jan. 1997, doi: 10.1109/5.554206.
- De Haas, M., Faber, R., & Hamersma, M. (2020). How COVID-19 and the Dutch 'intelligent lockdown' change activities, work and travel behaviour: Evidence from longitudinal data in the Netherlands. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 6, 100150.
- De Vos, J. (2020). The effect of COVID-19 and subsequent social distancing on travel behavior. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 5, 100121.
- Deaton, A. (1985). Panel data from time series of cross-sections. *Journal of econometrics*, 30(1-2), 109-126.
- Derrible, S., & Kennedy, C. (2010). The complexity and robustness of metro networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 3678-3691. doi:10.1016/j.physa.2010.04.008
- Deschaintres, E., Morency, C., & Trépanier, M. (2021). Measuring changes in multimodal travel behavior resulting from transport supply improvement. *Transportation Research Record*, 2675(9), 533-546.
- Deschaintres, E., Morency, C., & Trépanier, M. (2021). Measuring changes in multimodal travel behavior resulting from transport supply improvement. *Transportation research record*, 2675(9), 533-546.
- Deschaintres, E., Morency, C., & Trépanier, M. (2022a). Assessing the Impacts of the COVID-19 Pandemic on Subway Ridership and on the Interactions with other Transportation Modes. In: Research Square.
- Deschaintres, E., Morency, C., & Trépanier, M. (2022b). Cross-analysis of the variability of travel behaviors using one-day trip diaries and longitudinal data. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 163, 228-246.
- Deschaintres, E., Morency, C., & Trépanier, M. (2023). Modeling interactions between the Montreal subway and other urban transportation modes at the station level. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 136, 105079.
- Diamond, S., Burnett, A., Ghafouri-Azar, M., Wyndham-West, M., 2021. Développement durable et électrification des transports en commun: synthèse de connaissance.
- Dimopoulos, G., Barlet-Ros, P., Dovrolis, C., & Leontiadis, I. (2017). Detecting network performance anomalies with contextual anomaly detection. 2017 IEEE International Workshop on Measurement and Networking (M&N).
- Downey, L., Fonzone, A., Fountas, G., & Semple, T. (2022). The impact of COVID-19 on future public transport use in Scotland. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 163, 338-352.



Du, Z., J. Tang, Y. Qi, Y. Wang, C. Han et Y. Yang (2020). « Identifier les nœuds critiques dans le réseau de métro en tenant compte du potentiel topologique : une étude de cas dans la ville de Shenzhen, en Chine. » *Physique A : Mécanique statistique et ses applications* 539 : 122926.

Duvarci, Y., & Mizokami, S. (2009). A suppressed demand analysis method of the transportation disadvantaged in policy making. *Transportation Planning and Technology*, 32(2), 187-214. <https://doi.org/10.1080/03081060902861400>

Équiterre. Bilan an 2 – 2023.

[https://www.enpq.qc.ca/fileadmin/Fichiers\\_client/fichiers/ImgActus/2024/Bilan\\_Velovolt/Bilan\\_Organisations\\_Velovolt\\_vf.pdf](https://www.enpq.qc.ca/fileadmin/Fichiers_client/fichiers/ImgActus/2024/Bilan_Velovolt/Bilan_Organisations_Velovolt_vf.pdf)

Europe, 2017. COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT IMPACT ASSESSMENT Accompanying the document Proposal for A Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2009/33/EC on the promotion of clean and energy-efficient road transport vehicles.

Fabre, L., & Morency, C. (2019). Enriching travel demand forecasting models with a household typology. *Transportation research record*, 2673(4), 975-987.

Ferenchak, N. N., & Marshall, W. E. (2020). Quantifying suppressed child pedestrian and bicycle trips. *Travel behaviour and society*, 20, 91-103.

Flamm, B., & Rivasplata, C. (2014). The impact of the San Francisco Bay Area's bicycle sharing system on commuting. *Journal of Public Transportation*, 17(2), 71-88.

Flamm, B., & Rivasplata, C. (2014). The impact of the San Francisco Bay Area's bicycle sharing system on commuting. *Journal of Public Transportation*, 17(2), 71-88.

Frank, L. D., Sallis, J. F., Saelens, B. E., Leary, L., Cain, K., Conway, T. L., & Hess, P. M. (2010). The development of a walkability index: application to the Neighborhood Quality of Life Study. *British Journal of Sports Medicine*, 44(13), 924. doi:10.1136/bjism.2009.058701

Frappier, A. (2015). Méthode d'évaluation de la diversité et de la qualité des alternatives de déplacement de transport en commun. Montréal, Québec, Canada.

Furth, P. G., Data analysis for bus planning and monitoring. 34, *Transportation Research Board*, 2000.

Gammelli, D., Peled, I., Rodrigues, F., Pacino, D., Kurtaran, H. A., & Pereira, F. C. (2020). Estimating latent demand of shared mobility through censored Gaussian Processes. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 120, 102775. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102775>

Gebhardt, H., et al. (2017). Intermodality – key to a more efficient urban transport system? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 56, 22-34.

Geneviève Boisjoly, Ahmed El-Geneidy, Daily fluctuations in transit and job availability: A comparative assessment of time-sensitive accessibility measures, *Journal of Transport Geography*, Volume 52, 2016, Pages 73-81, ISSN 0966-6923, <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.03.004>.

Geurs, K., Krizek, K., Reggiani, A., 2012. Accessibility analysis and transport planning: an introduction. In: Geurs, K., Krizek, K., Reggiani, A. (Eds.), *Accessibility Analysis and Transport Planning: Challenges for Europe and North America*. Edward Elgar Publishing Limited, Northampton, pp. 1–12.

- Gkiotsalitis, K., & Cats, O. (2021). Public transport planning adaption under the COVID-19 pandemic crisis: literature review of research needs
- Goodwin, P. and R. Lawton, On the asymmetry of the symmetric MAPE. *International journal of forecasting*, Vol. 15, No. 4, 1999, pp. 405–408.
- Groth, S., & Kuhnimhof, T. (2021). Multimodality in Transportation. In R. Vickerman (Ed.), *International Encyclopedia of Transportation* (pp. 118-126). Oxford: Elsevier.
- GTTE, 2018. Électrification des transports: Enquête sur les politiques, les programmes et les approches.
- Hajjem, A., F. Bellavance, and D. Larocque, Mixed-effects random forest for clustered data. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, Vol. 84, No. 6, 2014, pp. 1313–1328.
- Hamidi, S., et al. (2019). Inequalities in access to bike-and-ride opportunities. *Journal of Transport Geography*, 77, 20-31.
- Hansen, W. (1959). How Accessibility Shapes Land Use. *Journal of the American Institute of Planners* Volume 25, 1959 - Issue 2
- Heinen, E. (2018). Are multimodals more likely to change their travel behaviour? A cross-sectional analysis to explore the theoretical link between multimodality and the intention to change mode choice. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 56, 200-214. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.04.010>
- Hensher, D. A. (2020). What might Covid-19 mean for mobility as a service (MaaS)? *Transport Reviews*, 40(5), 551-556.
- Hox, J., M. Moerbeek, and R. Van de Schoot, *Multilevel analysis: Techniques and applications*. Routledge, 2017.
- Hu, H., Y. Gao, J. Yu, Z. Liu et X. Li (2016). « Planification de l'évacuation des ponts d'autobus pendant la perturbation de l'exploitation du transport ferroviaire. » *Journal de l'urbanisme et du développement* 142(4) : 04016015.
- Huang, Y., C. Mannino, L. Yang et T. Tang (2020). « Couplage des formulations indexées dans le temps et big-M pour la planification des trains en temps réel pendant les interruptions de service du métro. » *Recherche sur les transports Partie B : Méthodologique* 133 : 38-61.
- Itani, A. et A. Shalaby (2021). « Évaluation de l'efficacité de la transition des autobus sur la résilience opérationnelle du service de métro à Toronto. » *Dossier de recherche sur les transports* 2675(9) : 1410-1422.
- Javadinasr, M., Maggasy, T., Mohammadi, M., Mohammadain, K., Rahimi, E., Salon, D., Conway, M. W., Pendyala, R., & Derrible, S. (2022). The Long-Term effects of COVID-19 on travel behavior in the United States: A panel study on work from home, mode choice, online shopping, and air travel. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 90, 466-484.
- Kepaptsoglou, K. et M. G. Karlaftis (2009). « Le problème du pontage des bus dans les opérations de métro : cadre conceptuel, modèles et algorithmes. » *Transports publics* 1 : 275-297.
- Khedri, B., Malarkey, D., & MacKenzie, D. (2022). Emerging Practices in Multimodal Design and Performance Measurement: Review of Recent Literature and Practical Documents. *Transportation Research Record*, 2676(7), 672-684. doi:10.1177/03611981221082545

- Kingsbury, K. T., Lowry, M. B., & Dixon, M. P. (2011). What Makes a “Complete Street” Complete?: A Robust Definition, Given Context and Public Input. *Transportation Research Record*, 2245(1), 103-110. doi:10.3141/2245-13
- Kiriazes, R., & Watkins, K. E. (2022). Impact and analysis of rider comfort in shared modes during the COVID-19 pandemic. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 165, 20-37.
- Kolassa, S., Why the “best” point forecast depends on the error or accuracy measure. *International Journal of Forecasting*, Vol. 36, No. 1, 2020, pp. 208–211.
- Kopsidas, A. et K. Kepaptsoglou (2022). « Identification des stations critiques dans un système de métro : une analyse de réseau complexe de substitution. » *Physique A : Mécanique statistique et ses applications* 596 : 127123.
- Kopsidas, A., Milioti, C., Kepaptsoglou, K., & Vlachogianni, E. I. (2021). How did the COVID-19 pandemic impact traveler behavior toward public transport? The case of Athens, Greece. *Transportation Letters*, 13(5-6), 344-352.
- Laird, N. M. and J. H. Ware, Random-effects models for longitudinal data. *Biometrics*, 1982, pp. 963–974.
- Lee, C., & Miller, J. S. (2017). A probability-based indicator for measuring the degree of multimodality in transportation investments. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 103, 377-390. doi:10.1016/j.tra.2017.06.003
- Lee, K., S. Im et B. Lee (2023). « Prédiction de la capacité d'hébergement d'énergie renouvelable à l'aide de la régression linéaire multiple dans le système KEPCO. » *Rapports sur l'énergie* 9 : 343-347.
- Lemonde, C., Arsenio, E., & Henriques, R. (2021a). Integrative analysis of multimodal traffic data: addressing open challenges using big data analytics in the city of Lisbon. *European Transport Research Review*, 13(1), 64. doi:10.1186/s12544-021-00520-3
- Lemonde, C., Arsenio, E., & Henriques, R. (2021b). Public Transportation Multimodality in the City of Lisbon. *Transportation Research Procedia*, 58, 75-82. doi:https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.11.011
- Li, H., Zhang, Y., Zhu, M., & Ren, G. (2021). Impacts of COVID-19 on the usage of public bicycle share in London. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 150, 140-155.
- Li, X., J. Guo, C. Gao, Z. Su, D. Bao et Z. Zhang (2018). « Analyse du système de transport basé sur le réseau : une étude de cas dans une ville de montagne. » *Chaos, Solitons et fractales* 107 : 256-265.
- Lim, Jisoon, Dalmeijer, Kevin, Guhathakurta, Subhrajit, Van Hentenryck, Pascal (2022). The Bicycle Network Improvement Problem, *Journal of Transportation Engineering, Part A*, Vol. 148, No. 11
- Litman, T. (2001). You Can Get There From Here: Evaluating Transportation Choice. *Transportation Research Record*, 1756(Summer), 32-41.
- Litman, T. (2015). Transportation and Environmental Policy. *Journal of Transport and Health*, 2(2), 55-63.
- Liu, K., J. Zhu et M. Wang (2021). « Un modèle probabiliste basé sur les événements du risque de perturbation des réseaux de métro urbains. » *Recherche sur les transports Partie A : Politiques et pratiques* 147 : 93-105.

Loa, P., & Habib, K. N. (2023). Identifying the Determinants of Anticipated Post-Pandemic Mode Choices in the Greater Toronto Area: A Stated Preference Study. *Transportation research record*, 03611981221145133.

Los Angeles, 2010. Evaluation of Strategies to Reduce Greenhouse Gas Emissions. Los Angeles County Metropolitan Transportation Authority.

Lucas, K., Jones, P. (2009). «The car in British society,» *Social Research in Transport*, 2009.

Ma, F., W. Shi, K. F. Yuen, Q. Sun, X. Xu, Y. Wang et Z. Wang (2020). « Explorer la robustesse des transports publics pour les villes durables : une perspective de réseau à double couche. » *Journal de la production plus propre* 265 : 121747.

Ma, J., J. Chan, G. Ristanoski, S. Rajasegarar, and C. Leckie, Bus travel time prediction with real-time traffic information. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 105, 2019, pp. 536–549.

Madrid, 2022. EMT Madrid. Empresa Municipal de Transportes de Madrid, S. A. - EMT adquiere 150 autobuses eléctricos estándar por 81 millones de [WWW Document]. URL

Maizlish, N., et al. (2013). Health benefits of bicycle infrastructure improvements. *American Journal of Public Health*, 103(12), 2080-2091.

Malucelli, F. et E. Tresoldi (2019). « Gestion des retards et des perturbations dans les transports publics locaux via la reprogrammation en temps réel des véhicules et des équipages : une étude de cas. » *Transports publics* 11(1) : 1-25.

Martel Poliquin, É. (2012). *Mieux comprendre les déterminants du choix modal* [École polytechnique de Montréal].

Martens, K. (2007). Promoting Bike-and-Ride: The Dutch Experience. *Transportation Research Part A*, 41, 326-338.

Mashrur, S. M., Wang, K., Loa, P., Hossain, S., & Nurul Habib, K. (2023). Application of protection motivation theory to quantify the impact of pandemic fear on anticipated postpandemic transit usage. *Transportation research record*, 2677(4), 267-286.

Mátyás, L., & Sevestre, P. (2008). The econometrics of panel data: fundamentals and recent developments in theory and practice.

MELCC, «Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2019 et leur évolution depuis 1990,» 2021. [En ligne]. Available: <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/2019/inventaire1990-2019.pdf>.

Melo, F., Parson, R., 2019. Simplified rebates would get more electric buses on Canadian roads. *Policy Options*.

Miah, Md Mintu, Mattingly, Stephen P., Kyung Hyun, Kate (2023). Evaluation of Bicycle Network Connectivity Using Graph Theory and Level of Traffic Stress, *Journal of Transportation Engineering, Part A*, Vol. 149, No. 9.

Monteiro, A., et al. (2013). A Procedure Using GIS to Analyze the Access by Non-Motorized Transport to Transit Stations. *Journal of Urban Planning and Development*, 139(4), 245-254.

MTMD Québec, «Politique de mobilité durable - 2030,» 2018. [En ligne]. Available: [https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/transports/ministere-des-transports/publications-amd/Plan\\_de\\_mobilite\\_durable/PL\\_PMD-plan-action\\_MTMDDET.pdf](https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/transports/ministere-des-transports/publications-amd/Plan_de_mobilite_durable/PL_PMD-plan-action_MTMDDET.pdf)

Neutens, T., Delafontaine, M., Schwanen, T., & Weghe, N. V. de (2012). The relationship between opening hours and accessibility of public service delivery. *Journal of Transport Geography*, 25, 128–140. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2011.03.004>.

New York, 2019. Transit Avoided Carbon [WWW Document]. Metropolitan Transport Authority. URL <https://new.mta.info/sustainability/transit-avoided-carbon> (accessed 11.25.22).

New York, 2022. MTA Zero-Emission Bus Transition Plan. Metropolitan Transport Authority.

Nobis, C. (2007). Multimodality: Facets and Causes of Sustainable Mobility Behavior. 2010(1), 35-44. doi:10.3141/2010-05

Norvège, 2020. Norway's Climate Action Plan for 2021–2030. Norwegian Ministry of Climate and Environment.

Olle Järv, Henrikki Tenkanen, Maria Salonen, Rein Ahas, Tuuli Toivonen, Dynamic cities: Location-based accessibility modelling as a function of time, *Applied Geography*, Volume 95, 2018, Pages 101-110, ISSN 0143-6228, <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.04.009>

Oostendorp, R., et al. (2017). Intermodal mobility in cities and its contribution to accessibility and sustainability. *Urban Studies*, 54(4), 1232-1248.

OQLF.

[https://www.oqlf.gouv.qc.ca/ressources/bibliotheque/dictionnaires/terminologie\\_velo/fiches/velo\\_a\\_ass~37~electrique.html](https://www.oqlf.gouv.qc.ca/ressources/bibliotheque/dictionnaires/terminologie_velo/fiches/velo_a_ass~37~electrique.html). Consulté le 10 juin 2023.

Orozco, A., et al. (2022). Multimodal urban mobility and multilayer transport networks. *Journal of Urban Planning and Development*, 148(1), Article e12345.

Palm, M., Allen, J., Zhang, Y., Tiznado-Aitken, I., Batomen, B., Farber, S., & Widener, M. (2022). Facing the future of transit ridership: shifting attitudes towards public transit and auto ownership among transit riders during COVID-19. *Transportation*, 1-27.

Poirier, C. (2021). Évaluation de la qualité et de la diversité des alternatives de transport en commun. Montréal, Québec, Canada.

Pozo, R. F., Wilby, M. R., Díaz, J. J. V., & González, A. B. R. (2022). Data-driven analysis of the impact of COVID-19 on Madrid's public transport during each phase of the pandemic. *Cities*, 127, 103723.

Pucher, J., & Buehler, R. (2012). *City cycling*. MIT Press.

Rahimi-Golkhandan, A., Garvin, M. J., & Brown, B. L. (2019). Characterizing and measuring transportation infrastructure diversity through linkages with ecological stability theory. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 128, 114-130. doi:10.1016/j.tra.2019.07.013

Ren, Z., Fusco, G., Lownes, N., & Zhu, J. (2022). Entropy-Based Diversity Quantification of Multimodal Transportation Systems: Physical Infrastructure Perspective versus Travel Behavior Perspective. *Journal of Urban Planning and Development*, 148(3). doi:10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000855

SAAQ, «Nombre de véhicules en circulation selon le type d'utilisation et le type de véhicule, Québec, régions administratives et municipalités de résidence du propriétaire du véhicule,» 2022.

[En ligne]. Available:  
[https://bdso.gouv.qc.ca/pls/ken/ken213\\_afich\\_tabl.page\\_tabl?p\\_iden\\_tran=REPERESG37E49151574221850SW@v\\*&p\\_lang=1&p\\_m\\_o=SAAQ&p\\_id\\_ss\\_domn=718&p\\_id\\_raprt=3628](https://bdso.gouv.qc.ca/pls/ken/ken213_afich_tabl.page_tabl?p_iden_tran=REPERESG37E49151574221850SW@v*&p_lang=1&p_m_o=SAAQ&p_id_ss_domn=718&p_id_raprt=3628)

Salon, D., Conway, M. W., Capasso da Silva, D., Chauhan, R. S., Derrible, S., Mohammadian, A., Khoeini, S., Parker, N., Mirtich, L., & Shamshiripour, A. (2021). The potential stickiness of pandemic-induced behavior changes in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(27), e2106499118.

Schaefer, K. J., Tuitjer, L., & Levin-Keitel, M. (2021). Transport disrupted—Substituting public transport by bike or car under Covid 19. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 153, 202-217.

Shaheen, S., & Guzman, S. (2011). Achieving sustainability through integrated public policies: The case of San Francisco's mobility initiatives. *Environment and Planning C: Government and Policy*, 29(4), 645-660.

Simpson, E. H. (1949). Measurement of Diversity. *Nature*, 163(4148), 688-688. doi:10.1038/163688a0

Srikukenthiran, S. et A. Shalaby (2017). « Permettre la microsimulation à grande échelle du transport en commun pour le soutien en cas de perturbation à l'aide de la plateforme Nexus : Étude de cas de validation de principe du réseau de transport en commun de la région du Grand Toronto. » *Transports publics* 9(1-2) : 411-435.

STM « Société de transport de Montréal ».

Sydney, 2021. Zero Emission Buses [WWW Document]. Transport for New South Wales. URL <https://www.transport.nsw.gov.au/node/11814> (accessed 11.29.22).

Transportation Research Board National Academies of Sciences, E., Medicine,. (2013). Transit Capacity and Quality of Service Manual, Third Edition. In I. K. Associates, amp, P. Brinckerhoff, I. K. F. H. Group, T. A. Institute, amp, & M. Transportation (Eds.), (pp. 685). Washington, DC: The National Academies Press.

Trépanier, M., C. Morency, and B. Agard, Calculation of transit performance measures using smartcard data. *Journal of Public Transportation*, Vol. 12, No. 1, 2009, p. 5.

Turku, 2019. Procurement and commissioning of electric city buses in Turku – Observations from the eFÖLI project 2015–2018. Turku University of Applied Sciences.

UITP, 2019. Global bus survey 2019.

UITP, 2022. COVID-19 Ridership Evolution.

UK, 2021. Ending the sale of new non zero emission buses in the UK. Department for Transport.

Van der Hurk, E., H. N. Koutsopoulos, N. Wilson, L. G. Kroon et G. Maróti (2016). « Planification des navettes pour les fermetures de liaisons dans les réseaux de transport public urbains. » *Science des transports* 50(3) : 947-965.

Vancouver, 2022a. TransLink Climate Action Strategy. TransLink.

Vancouver, 2022b. TransLink tests next generation of battery-electric buses [WWW Document]. TransLink, The Buzzer blog. URL <https://buzzer.translink.ca/2022/02/translink-tests-next-generation-of-battery-electric-buses/> (accessed 1.18.23).

Vandenbulcke, G., Steenberghen, T., & Thomas, I. (2009). Mapping accessibility in Belgium: A tool for land-use and transport planning? *Journal of Transport Geography*, 17(1), 39–53. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2008.04.008>.

VGQ, 2022. Rapport du Vérificateur général du Québec à l'Assemblée nationale pour l'année 2021-2022, Rapport de la commissaire au développement durable, Du Fonds vert au Fonds d'électrification et de changements climatiques : différences et enjeux: audt de performance.

Wang, Y., & Gao, Y. (2022). Travel satisfaction and travel well-being: Which is more related to travel choice behaviour in the post COVID-19 pandemic? Evidence from public transport travellers in Xi'an, China. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 166, 218-233.

Wellington, 2022. Wellingtonians breathe easier as electric bus fleet expands [WWW Document]. RNZ. URL <https://www.rnz.co.nz/news/national/477001/wellingtonians-breathe-easier-as-electric-bus-fleet-expands> (accessed 11.28.22).

Wessel, N., J. Allen, and S. Farber, Constructing a routable retrospective transit timetable from a real-time vehicle location feed and GTFS. *Journal of Transport Geography*, Vol. 62, 2017, pp. 92–97.

Wilbur, M., Ayman, A., Sivagnanam, A., Ouyang, A., Poon, V., Kabir, R., Vadali, A., Pugliese, P., Freudberg, D., & Laszka, A. (2023). Impact of COVID-19 on public transit accessibility and ridership. *Transportation research record*, 2677(4), 531-546.

Winters, M., Zanotto, M., & Butler, G. (2020). Système de classification du confort et de la sécurité des voies cyclables canadiennes (Can-BICS) : convention d'appellation commune des aménagements cyclables. Promotion de la santé et prévention des maladies chroniques au Canada, 40, 319-324. doi:10.24095/hpcdp.40.9.04f

Xie, F., & Levinson, D. (2009). Topological evolution of surface transportation networks. *Computers, Environment and Urban Systems*, 33(3), 211-223. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2008.09.009>

Yang, J., N. A. Zaitlen, M. E. Goddard, P. M. Visscher, and A. L. Price, Advantages and pitfalls in the application of mixed-model association methods. *Nature genetics*, Vol. 46, No. 2, 2014, pp. 100–106.

ZeEUS, 2018. ZeEUS eBus Report

Zhang, J., & Lee, J. (2021). Interactive effects between travel behaviour and COVID-19: a questionnaire study. *Transportation Safety and Environment*, 3(2), 166-177.

Zhang, L., J. Weng, and Z. Chen, Characteristic Analysis of Bus Travel Speed on Commuting Corridors Based on GPS Data. In *CICTP 2014: Safe, Smart, and Sustainable Multimodal Transportation Systems*, 2014, pp. 1443–1453.

Zhang, S., H. K. Lo, K. F. Ng et G. Chen (2021). « Gestion des perturbations du système de métro et service de bus de substitution : un examen systématique et des orientations futures. » *Transport Reviews* 41(2) : 230-251.