

Chaire Mobilité

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

Rapport d'activités 2022



Chaire Mobilité

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

Rapport d'activités 2022

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 – 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 2023

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 d'activités 2022, Polytechnique Montréal, 146 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	Collaborateurs	2
1.2.3	Comité scientifique.....	4
1.3	Programme de recherche.....	4
1.4	Contenu du rapport.....	5
2	Activités de recherche	6
2.1	Maîtrises complétées en 2022	6
2.2	Comportements de déplacements anticipés dans un monde post-pandémie	7
2.2.1	Introduction.....	7
2.2.2	Revue de la littérature.....	8
2.2.3	Données.....	10
2.2.4	Méthodologie.....	10
2.2.5	Résultats et discussion	12
2.2.6	Conclusion	19
2.3	Vulnérabilité des réseaux de transport en commun.....	21
2.3.1	Introduction.....	21
2.3.2	Contexte	21
2.3.3	Méthodologie	24
2.3.4	Étude de cas.....	27
2.3.5	Résultats et discussion	29
2.3.6	Conclusion et travaux.....	32
2.4	Typologie de segments pour soutenir le développement de cycles de conduite.....	34
2.4.1	Introduction.....	34
2.4.2	Revue de la Littérature	35
2.4.3	Modèle conceptuel de la méthodologie de recherche et de la structure des données	38
2.4.4	Générer une typologie de route.....	40
2.4.5	Conclusion	42
2.5	Fiabilité des services de transport en commun.....	44

2.5.1	Introduction.....	44
2.5.2	Revue de la littérature.....	45
2.5.3	Cadre de recherche et méthodologie.....	45
2.5.4	Variations spatiales et temporelle des distributions de mélange.....	46
2.5.5	Variables liées aux distributions de mélanges.....	49
2.5.6	Conclusions.....	51
2.6	Méthodologie d'évaluation de la qualité des accès actifs aux stations de métro	53
2.6.1	Objectifs.....	53
2.6.2	Revue de littérature.....	53
2.6.3	Méthodologie	54
2.6.4	Résultats	55
2.7	Étude des déménagements dans un contexte pandémique.....	57
2.7.1	Introduction.....	57
2.7.2	Données.....	57
2.7.3	Modèles.....	61
2.7.4	Résultats	62
2.7.5	Conclusion	69
2.8	Fardeau du répondant dans les enquêtes web.....	71
2.8.1	Introduction.....	71
2.8.2	Revue de littérature.....	72
2.8.3	Données.....	77
2.8.4	Développement d'un modèle.....	80
2.8.5	Conclusions et discussion	85
2.9	Conception de réseaux cyclables par algorithme génétique	87
2.9.1	Introduction.....	87
2.9.2	Problématique.....	87
2.9.3	Revue de littérature.....	88
2.9.4	Design de réseaux cyclables	90
2.9.5	Objectifs.....	90
2.9.6	Méthodes de résolution	91
2.9.7	Méthodologie	93
2.9.8	Conclusion	96
2.10	Scénarios de réduction de GES pour Montréal	97
2.10.1	Introduction.....	97
2.10.2	Méthodologie générale	98

2.10.3	Résultats	109
2.10.4	Conclusion	111
2.11	Analyse automatisée du stationnement sur rue	113
2.11.1	Introduction.....	113
2.11.2	Méthodologie	113
2.11.3	Résultats	118
2.11.4	Conclusion	120
2.12	Abordabilité intégrée transport-habitation	122
2.12.1	Introduction.....	122
2.12.2	Méthodologie	122
2.12.3	Résultats	124
2.12.4	Conclusion	129
2.13	Transition : état d'avancement du développement.....	130
3	Rayonnement	132
3.1	Publications (2022).....	132
3.2	Principales participations à des congrès	132
3.2.1	Congrès annuel du Transportation Research Board 2022.....	132
3.2.2	Congrès annuel de l'AQTR 2022	133
3.2.3	CTRF 2022 (Canadian Transport Research Forum).....	133
3.2.4	NARSC 2022 (69th North American Meetings of the Regional Science Association International).....	133
3.2.5	ISCTSC 2022 (Transport Survey Methods Conference)	133
4	Références.....	134

Liste des figures

Figure 1-1. Représentation schématique du programme de recherche de la Chaire Mobilité	5
Figure 2-1. WCS de différentes valeurs K pour les données de l'enquête COVID 2020.....	13
Figure 2-2. Diagramme des centres de clusters pour chacun des quatre clusters de l'enquête COVID 2020	13
Figure 2-3. Réseau du métro urbain de Montréal.....	27
Figure 2-4 Configuration du RMU de Montréal après la première perturbation ciblée	28
Figure 2-5. Processus de dégradation du RMU de Montréal	30
Figure 2-6. Comparaison des indicateurs d'évaluation de la vulnérabilité des implémentations BBFS et NBFS	31
Figure 2-7 Processus de dégradation basé sur BBFS et NBFS	32
Figure 2-8. Modèle conceptuel de la méthodologie de recherche	38
Figure 2-9. Typologie du réseau de l'île de Montréal selon l'approche 1	42
Figure 2-10. Méthodologie générale de la recherche.....	46
Figure 2-11. Variations temporelles par voyage	47
Figure 2-12. Variations temporelles au niveau des points de contrôle	47
Figure 2-13. Variations temporelles par paire d'arrêts.....	48
Figure 2-14. Variations spatiales par paire d'arrêts	48
Figure 2-15. Méthodologie de délimitation des bassins d'attraction	54
Figure 2-16. Indicateurs de caractérisation des bassins d'attraction.....	55
Figure 2-17. Les bassins d'attraction.....	56
Figure 2-18 Volonté des ménages de déménager selon le secteur municipal de résidence (Chaire Mobilité, 2020)	63
Figure 2-19 Arbre de décision de la volonté des ménages de se relocaliser (Bleu = n'envisage pas déménager et Vert = envisage déménager).....	64
Figure 2-20 Arbre de décision sur la volonté de déménager des ménages autres que les « jeunes couples ».....	65
Figure 2-21 Occurrence des raisons motivant la volonté de déménager	67
Figure 2-22 Nombre de raisons sélectionnées par les répondants.....	69
Figure 2-23. Facteurs associés du fardeau du répondants (Bradburn 1978)	73
Figure 2-24. La relation entre le fardeau de réponse et les éléments efficaces (Fisher et Kydonieffs 2001).....	74
Figure 2-25. L'interaction entre le répondant et l'enquête menant au fardeau de réponse et à la gratification, reproduite de (Haraldsen 2004)	74
Figure 2-26. Modèle structurel du fardeau du répondant, reproduit de (Fricker, Yan et al. 2014)	75
Figure 2-27. Modèle de trajectoire PLS du fardeau reproduit à partir de Fricker, Kreisler et al. (2012)	75
Figure 2-28. Interface graphique de l'outil d'enquête et conception des questions d'enquête ..	78
Figure 2-29. Distribution des variables mesurées	79
Figure 2-30. Perception du temps	79
Figure 2-31. Une solution à trois facteurs, un diagramme de cheminement de la spécification du modèle de mesure (modèle CFA).....	82
Figure 2-32. Un diagramme de chemin des spécifications des modèles structurels et de mesure	85

Figure 2-33 : Exemple d'encodage de solution à 13 variables binaires sous forme de chromosome.	92
Figure 2-34: Exemple d'extraction du réseau routier pour une portion de la ville de Laval à partir d'OpenStreetMap.....	94
Figure 2-35 Schéma méthodologique général	99
Figure 2-36 Facteur de correction de la consommation d'essence en fonction de la vitesse du véhicule	101
Figure 2-37 Schéma général de l'évaluation des scénarios de réduction des GES	103
Figure 2-38 Distribution du nombre de déplacements selon la période horaire.....	106
Figure 2-39 Exemple de l'altération de la chaîne d'activité d'un télétravailleur	108
Figure 2-40 Répartition des GES émis selon la région de domicile des ménages	109
Figure 2-41 Panneau utilisé pour l'exemple de codification de la signalisation de stationnement	115
Figure 2-42 Référencement linéaire sur la géobase double (Bourdeau et Morency, 2022).....	116
Figure 2-43 Logigramme de détermination du sens de codification des flèches (Bourdeau et Morency, 2022)	117
Figure 2-44 Logigramme de création des zones de stationnement (Bourdeau et Morency, 2022)	118
Figure 2-45 Distribution des interstices de stationnement par zone de stationnement.....	119
Figure 2-46 Utilisation des zones de stationnement sur rue réservé aux résidents (SRRR) le lundi 9 mai 2022 à 20h00	120
Figure 2-47: Profils d'accumulation des résultats obtenus par l'ajout de mots-clés.....	123

Liste des tableaux

Tableau 2-1. Centres de cluster de l'enquête COVID 2020 (K = 4).....	13
Tableau 2-2. Résultats du modèle de régression logistique avec les données de l'enquête COVID 2020.....	18
Tableau 2-3 Rôle des SDCF dans une ligne de métro.....	23
Tableau 2-4 Caractéristiques du RMU de Montréal (État normal).....	27
Tableau 2-5 Détails des blocs du RMU de Montréal.....	28
Tableau 2-6 Caractéristiques de l'RMU de Montréal après la première perturbation.....	29
Tableau 2-7 Caractéristiques du RMU de Montréal lors de la dégradation.....	30
Tableau 2-8. Description des données utilisées dans l'étude.....	39
Tableau 2-9. Matrice de confusion pour les méthodes de classification aux différents niveaux d'analyse.....	49
Tableau 2-10. Coefficients de régression logistique.....	50
Tableau 2-11 Description des typologies de ménages.....	58
Tableau 2-12 Analyse descriptive des variables de proximité.....	59
Tableau 2-13 Résumé des variables utilisées dans le modèle de régression sur la volonté de se relocaliser.....	60
Tableau 2-14 Importance des variables sur la volonté de déménager des ménages autres que "Jeunes couples".....	65
Tableau 2-15 Importance des variables sur la volonté de déménager pour les ménages autres que les « jeunes couples ».....	66
Tableau 2-16 Comparaison des caractéristiques des ménages qui ont choisi ou non la raison « Se rapprocher de la nature ».....	68
Tableau 2-17 Occurrence de combinaisons de raisons, en fonction du nombre de réponses sélectionnées.....	69
Tableau 2-18. Point de fardeau basé sur le type et la complexité des questions, reproduit de (Schmid et Axhausen 2019).....	76
Tableau 2-19. Statistiques descriptives des variables mesurées.....	78
Tableau 2-20. Matrice de corrélation entre les variables.....	80
Tableau 2-21. Construits latents et leurs indicateurs.....	81
Tableau 2-22. Validité et fiabilité du modèle de mesure, racine carrée de l'AVE en gras et corrélation entre les construits en hors diagonal.....	83
Tableau 2-23. Relation entre les construits basés sur les estimations SEM.....	86
Tableau 2-24: Liste des variables utilisées dans la modélisation du problème.....	95
Tableau 2-25 Extrait des 15 véhicules les plus écoénergétiques en 2018.....	105
Tableau 2-26 Valeurs de référence pour la grande région de Montréal.....	110
Tableau 2-27 Tableau synthèse des réductions de GES par scénario.....	110
Tableau 2-28 Description des sources de données utilisées (Bourdeau et Morency, 2022).....	114
Tableau 2-29 Exemple de codification de la signalisation de stationnement.....	115
Tableau 2-30 Relation entre la longueur intervéhiculaire et la longueur totale des interstices de stationnement.....	119

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

1.2 Structure organisationnelle

1.2.1 Partenaires

La Chaire Mobilité a été initiée en 2010, par quatre partenaires institutionnels : la Ville de Montréal, la Société de transport de Montréal, le ministère des Transports 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 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

La Chaire compte aussi sur la contribution de six 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 aux 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.

- Un stagiaire post-doctoral a aussi contribué aux activités de la Chaire en 2022 soit Muhammad Zahir.

1.2.3 Comité scientifique

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

- Prof Kelly Clifton (depuis 2020): Civil and Environmental Engineering, Portland State University (facteurs qui influencent les décisions de transport);
- Dr Patrick Bonnel (depuis 2010): Laboratoire d'Économie des transports de Lyon (Analyse des comportements de mobilité urbaine, modélisation de la demande de transport);
- Pr Kostas Goulias: Laboratoire Geotrans de l'Université de Californie à Santa Barbara (Modélisation de la demande de transport, modèles d'activités, simulations par agents);
- Pr Antonio Paez: École de géographie et des sciences de la terre de l'Université McMaster (analyse spatiale et statistique, comportements de mobilité);
- Pr Matthew Roorda: Département de génie civil de l'Université de Toronto (modélisation du transport des marchandises et passagers).

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.

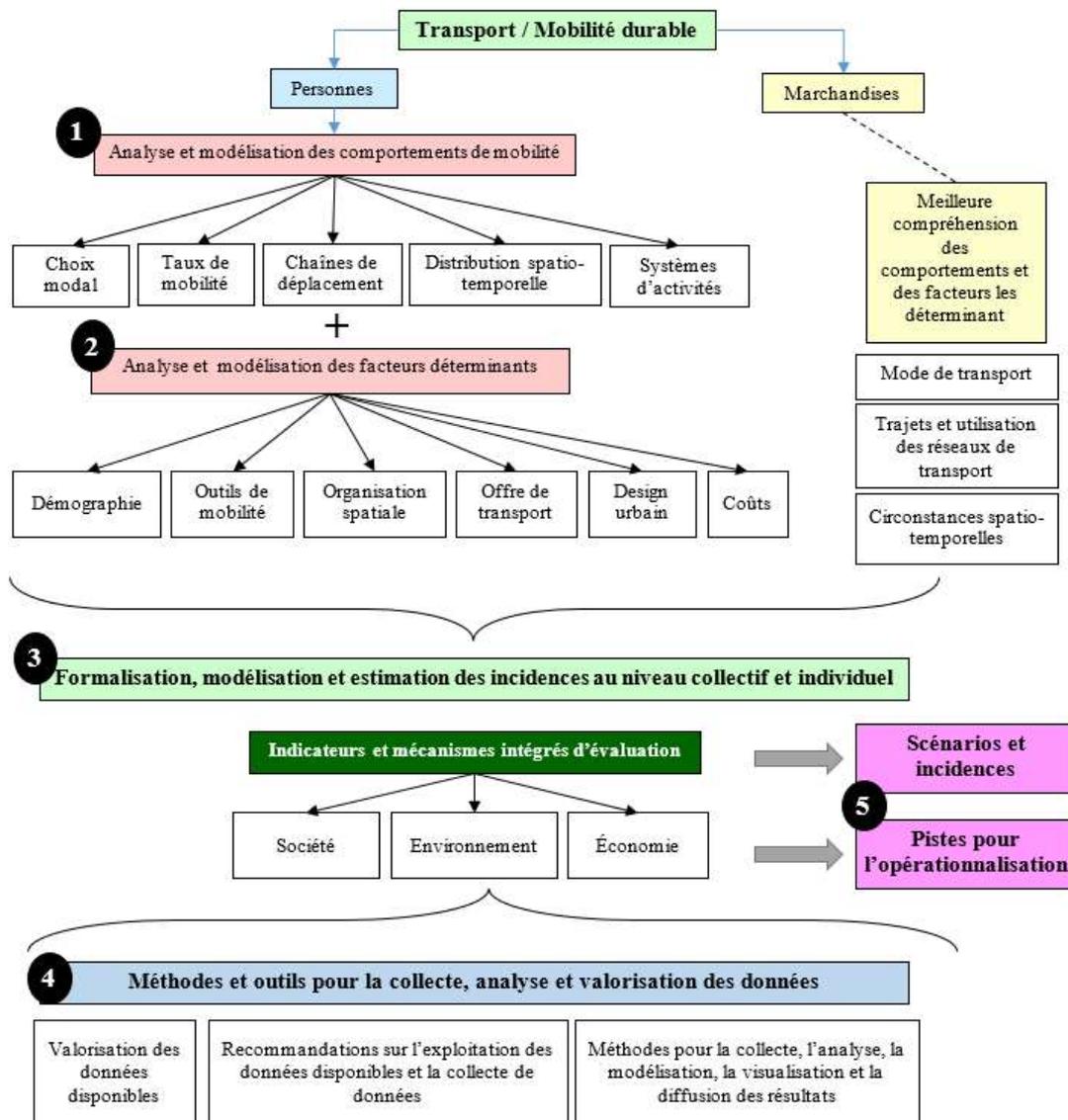


Figure 1-1. Représentation schématique du programme de recherche de la Chaire Mobilité

1.4 Contenu du rapport

Ce document fait état des activités de recherche conduites du 1^{er} janvier au 31 décembre 2022. Les différentes activités de recherche conduites par les étudiants et professionnels de la Chaire sont décrites dans la prochaine section. Différentes activités de rayonnement sont aussi présentées.

Les textes relatifs aux travaux de recherche des étudiantes sont souvent des extraits préliminaires de leurs futurs mémoires et thèses. Les mémoires et thèses complétés ne sont pas incluses dans le rapport mais sont référencés et peuvent être consultés par les partenaires.

Jérôme Laviolette et Élodie Deschaintres ayant complété leur thèse au moment de produire ce rapport, aucune synthèse de leurs travaux n'a été intégrée au présent rapport. Les thèses en

version finale sont toutefois disponibles pour consultation par les partenaires. Les activités de recherche de Mohamad Khachman sont par ailleurs en pause.

2 Activités de recherche

2.1 Maîtrises complétées en 2022

Ali Zadeh, H. (2022). Intercity Travel in Québec: Corridor Analysis and Demand Modelling, Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal.

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

Saoudi Hassani, M. (2022). Analyse des interactions entre étalement urbain, offre et demande en transport, Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal.

2.2 Comportements de déplacements anticipés dans un monde post-pandémie

- Par : Hamed Malekzadeh, doctorat
- Supervision : Pre Catherine Morency
- Contexte : Chaire Mobilité
- Fin prévue : décembre 2024

2.2.1 Introduction

La maladie à coronavirus de 2019 ou en bref COVID-19 est le nom donné par l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) à une maladie respiratoire causée par le SRAS-CoV-2 (Coronavirus 2 du syndrome respiratoire aigu sévère). Signalé pour la première fois à Wuhan, en Chine, en décembre 2019, le SRAS-CoV-2 est le nouveau coronavirus et le successeur du SRAS-CoV, un virus qui a causé une pandémie de fin 2002 à mi-2003 (CDC). Le SARS-CoV avait un taux de mortalité plus élevé que le SARS-CoV-2, mais le SARS-CoV-2 est plus facilement transmis car sa charge virale est à un niveau élevé, même aux premiers stades de l'infection. Au contraire, la charge virale d'une infection par le SARS-CoV culmine beaucoup plus tard dans la maladie (Healthline). Bien que le SRAS-CoV ait posé un taux de létalité plus élevé, l'épidémie a duré une courte période et a entraîné 8098 cas et 774 décès dans le monde (News-Medical). Au 24 août 2022, il y avait environ 601 millions de cas confirmés de COVID-19 et 6,48 millions de décès dans le monde (OMS). En raison du niveau de transmissibilité plus élevé du SARS-CoV-2, la pandémie a duré beaucoup plus longtemps, affectant de nombreux aspects de la vie humaine sur la planète. Bien que la COVID-19 soit fondamentalement une menace pour la santé de la vie des gens, ses impacts ne se limitent pas au domaine de la santé et vont bien au-delà de nombreuses dimensions telles que l'environnement, l'économie, les transports, l'éducation, le tourisme, etc.

Parmi tous les secteurs, la pandémie a eu de nombreuses répercussions sur le secteur des transports. Par exemple, il en a résulté un déclin de l'utilisation des transports en commun et du transport aérien, une augmentation de l'utilisation de la voiture privée et des modes de transport actifs (marche et vélo), une réduction substantielle des déplacements vers le travail et l'école, une réduction du niveau d'activités qui a entraîné une diminution du nombre de déplacements et des distances parcourues, la croissance des achats en ligne et du télétravail, la diminution significative de la fréquence de toutes sortes de voyages, l'augmentation des vitesses de déplacement, la réduction significative des accidents, en particulier ceux se produisant tôt le matin, la réduction du taux de décès causés par des accidents (Kim, 2021) et l'augmentation du nombre de personnes qui ont une attitude négative envers le transport en commun et une tendance vers les modes de transport privés (Sharifi & Khavarian-Garmsir, 2020).

La pandémie de COVID-19 a eu divers effets à court et à long termes sur de nombreux aspects de la vie humaine et de son environnement. Aujourd'hui, après plus de deux ans depuis le début de la pandémie, même si de nombreux pays ont relevé les règles de distanciation sociale et le port obligatoire du masque, les effets de la pandémie n'ont pas disparu et sont tangibles. En d'autres termes, non seulement certains des effets de la pandémie n'ont pas disparu, mais ils semblent s'établir comme une nouvelle normalité.

Dans cette recherche, nous nous concentrons sur les impacts de la COVID-19 sur les habitudes de mobilité et les comportements de déplacement des personnes. Dans cette perspective, les individus sont classés en fonction de leur fréquence anticipée de déplacement en période post-COVID (positionnée à l'automne 2022), et les déterminants de l'appartenance des individus à chacune des classes résultantes sont identifiés à l'aide de modèles de choix discrets. Cette étude vise à fournir des informations sur l'ère post-COVID et soutenir les villes dans leur capacité à

anticiper cette « nouvelle normalité ». Bien que seul le temps puisse véritablement témoigner des effets de la pandémie sur les comportements, les données sur lesquelles s'appuie la démarche correspondent aux anticipations des répondants quant à leurs futurs comportements et offrent des informations cruciales pour la compréhension des futurs possibles.

2.2.2 Revue de la littérature

L'apparition de la pandémie en 2020 a considérablement affecté les comportements de déplacement quotidiens des individus du monde entier. Comme la COVID-19 est une maladie respiratoire très contagieuse, elle a été déclarée pandémie mondiale par l'Organisation mondiale de la Santé le 11 mars 2020 (OMS, 2022). La déclaration de cette maladie comme une pandémie mondiale a entraîné des confinements extrêmes, des règles de distanciation sociale, des mesures d'auto-isollement et des restrictions de déplacement afin d'empêcher sa propagation et de protéger la vie des gens (Altmann, Douek, & Boyton, 2020). Les mesures préventives qui sont menées pour entraver la propagation du virus, en fin de compte, ont entraîné des niveaux de mobilité inférieurs et ont affecté les comportements typiques de déplacement des personnes. Afin d'identifier les comportements induits par la COVID et de comprendre les changements relatifs aux activités quotidiennes, enquêter sur la relation entre l'épidémie de COVID-19 et le transport est d'une grande importance.

Le réseau de transport d'une ville est l'une des composantes de base qui relie l'origine et la destination des différentes activités de l'individu. Ce rôle de connexion des réseaux de transport en fait l'un des domaines les mieux classés en ce qui concerne la probabilité de propagation et d'infection de la population par des maladies contagieuses, en particulier la COVID-19 (Thometz, 2020). En ce sens, les gens ont réduit leurs activités à l'extérieur de la maison pendant la pandémie afin de minimiser la probabilité d'être infectés. Cette réduction du niveau d'activités à l'extérieur du domicile a eu une incidence sur le comportement général des personnes dans différentes régions (Choi et coll., 2014). À titre d'exemple, le nombre de déplacements quotidiens a considérablement diminué en raison de la pandémie (Fatmi, 2020; Zhang & Lee, 2021) qui a donc entraîné une réduction de la congestion aux heures de pointe et une réduction de la circulation sur le réseau (Bucsky, 2020). De plus, au début de la pandémie, les distances parcourues ont connu une réduction, mais peu à peu la mobilité a repris particulièrement par l'utilisation de modes actifs (c'est-à-dire la marche et le vélo) avec la levée de certaines mesures notamment les confinements (Dingil & Esztergár-Kiss, 2021). Pendant la pandémie, les gens se sont considérablement dirigés vers une plus grande utilisation du vélo (Molloy, Tchervenkov, Hintermann, & Axhausen, 2020) et ils ont également développé une préférence pour l'utilisation de leur voiture privée car elle offrait des niveaux plus faibles d'interaction et de contact avec d'autres personnes (Troko et al., 2011).

De tous les différents modes de transport, le transport en commun et les modes de transport actif ont été les plus touchés. En effet, selon Bucsky (2020), le secteur du transport en commun a connu une réduction importante de l'achalandage (Bucsky, 2020). Dans une autre étude menée par De Vos (2020) sur l'effet de la COVID-19 et de la distanciation sociale sur les comportements de déplacement, il a été constaté que les mesures induites par la COVID ont généralement réduit la demande de transport, spécifiquement la demande de transport en commun (De Vos, 2020). Il existe de nombreuses études similaires sur les impacts de la COVID-19 sur l'utilisation des transports en commun. Zhang et Lee (2021) ont observé que les modes actifs (marche et vélo) ont pris la place des transports publics dans de nombreux cas (Zhang & Lee, 2021).

En ce qui concerne les taxis et les services de covoiturage, les résultats d'une étude menée sur les impacts de la COVID-19 sur les comportements d'activité des individus à Chicago, impliquent qu'en raison de la probabilité plus élevée d'être infecté par la COVID-19, l'utilisation des services de transport en commun, de taxi et de covoiturage a considérablement diminué (Shamshiripour, Rahimi, Shabanpour, & Mohammadian, 2020). Dans le cadre d'une autre enquête axée sur la baisse de l'achalandage du transport en commun et la réduction de la part des services de covoiturage, des résultats similaires ont été obtenus (Nian et coll., 2020). La peur d'attraper le virus d'une autre personne a été le principal facteur à l'origine de ces changements dans les habitudes de déplacement de routine des personnes pendant la COVID-19, ce qui a finalement entraîné une augmentation du télétravail et de l'apprentissage en ligne ainsi qu'une diminution de la participation aux activités et aux événements publics tout au long de la pandémie (De Vos, 2020; Zhang & Lee, 2021).

Lorsque nous examinons la recherche qui étudie les impacts de la pandémie sur les comportements de déplacement des individus, nous nous rendons compte que la majorité des recherches se concentrent sur l'état actuel du comportement de déplacement des individus. Ce qui manque et qui n'est pas suffisamment étudié dans la littérature existante, c'est la façon dont les gens prévoient voyager dans le monde post-COVID. On pourrait envisager qu'après une période de plus de deux ans depuis le début de l'épidémie de COVID-19, tous ses effets ont complètement disparu et il est inutile de les examiner. Cependant, il convient de noter que non seulement les preuves indiquent que le comportement des personnes n'est pas revenu à son état pré-COVID, mais nous sommes également confrontés à un phénomène appelé adhésivité du comportement. De plus, les études psychologiques liées à la formation d'habitudes dans le comportement des personnes confirment également l'existence d'une nouvelle normalité. Selon les résultats de Lally (Lally, Van Jaarsveld, Potts, & Wardle, 2010), il faut en moyenne 66 jours pour qu'une habitude se forme avec une plage de 18 à 254 jours. Aujourd'hui, nous avons dépassé la limite supérieure de ce seuil et il y a des comportements de mobilité qui se sont formés à travers les différentes phases de la COVID-19. Ces comportements semblent persister et avoir un impact permanent sur la façon dont les gens voyagent. En plus de tous ceux qui sont mentionnés, il y a la tendance à la hausse du nombre de personnes vaccinées au fil du temps. D'une part, étant donné que le nombre de personnes vaccinées augmente au fil du temps, et d'autre part, comme il y a des comportements qui semblent persister et avoir un impact permanent sur la façon dont les gens voyagent, il est essentiel d'enquêter sur les comportements de voyage anticipés des individus et d'être préparé pour le monde post-COVID.

Seules quelques recherches ont porté sur la façon dont les personnes prévoient voyager après la pandémie. Il a été découvert qu'en raison de la peur de l'infection virale, les gens peuvent voyager moins même après la pandémie, l'utilisation des transports en commun peut rester inférieure à ce qu'elle était avant la COVID-19, et une forte baisse des modes de transport partagés peut se produire (De Vos, 2020; Hensher, 2020). Au contraire, la marche et le vélo peuvent devenir très importants (Schwedhelm, Li, Harms, & Adriaola-Steil, 2020). Dans une étude qui a utilisé l'enquête de type panel de mobilité des Pays-Bas, de Haas et al. (2020) ont mené une analyse descriptive du comportement de déplacement anticipé des individus (De Haas, Faber, & Hamersma, 2020). Dans le cadre de leurs enquêtes, ils ont constaté que la majorité des répondants s'attendaient à utiliser tous les modes de transport autant qu'avant la COVID-19; cependant, l'attitude des voyageurs à l'égard de la voiture privée devrait s'améliorer, tandis que le transport en commun deviendrait moins souhaitable après la pandémie. Conway et al. (2020) ont lancé une enquête sur les personnes très instruites aux États-Unis. Ils ont découvert que, bien que les déplacements post-pandémiques par les transports en commun ne reviennent pas

entièrement à leur niveau d'utilisation pré-COVID, les individus sont plus enclins à marcher et à faire du vélo qu'ils ne l'étaient auparavant (Conway, Salon, da Silva, & Mirtich, 2020).

En résumé, la majorité des études connexes jusqu'à présent se sont concentrées sur l'étude descriptive des effets de la COVID-19 sur les comportements de déplacements potentiels des individus. La compréhension des observations comportementales dans la période post-COVID fait défaut et il n'est pas clair si les habitudes des individus reviendront à la normale ou changeront considérablement en termes de fréquence de déplacement et de préférences de mode. Par conséquent, il est nécessaire d'effectuer des analyses comportementales basées sur des techniques de modélisation statistique pour explorer les facteurs clés qui influencent différents types de comportements de déplacement anticipés des personnes. Ces analyses aideront les décideurs à créer des politiques et des stratégies efficaces et à long terme pour tenir compte des transitions dans les préférences de déplacement.

2.2.3 Données

Pour recueillir des informations sur la façon dont la COVID-19 a affecté les habitudes de déplacement et les systèmes d'activité, l'enquête COVID 2020 a été conçue en avril 2020. Le sondage a été réalisé en ligne à l'aide de la plateforme Évolution développée par l'équipe de la Chaire Mobilité (Bourbonnais & Morency, 2013). Cette plateforme a contribué à la mise en œuvre de plus de 15 autres sondages en ligne au cours des dernières années. L'enquête COVID 2020 a été divisée en quatre sections principales: l'emplacement du domicile et les attributs du ménage, les attributs de la personne, les comportements de déplacement avant et pendant la COVID-19 et les comportements de déplacements anticipés après la COVID (mode, fréquence, etc.). Dans la section relative aux comportements de déplacement post-COVID, les répondants ont été interrogés sur les changements prévus dans leurs comportements de déplacement, tels que la fréquence quotidienne des déplacements et l'utilisation de différents modes de transport après la COVID-19. Pour chaque mode de transport, dans cette section, il y avait quatre options de fréquence d'utilisation: jamais utilisé, utilisé moins qu'avant, utilisé de la même manière qu'avant et utilisé plus qu'avant l'épidémie.

Le 28 avril 2020, l'enquête a été mise en ligne. L'invitation à participer a été diffusée dans la presse, transmise à une banque de courriels (panel interne de répondants) et diffusée via les réseaux sociaux. L'enquête a été complétée par 1620 personnes. Cet échantillon ne peut pas être considéré comme représentatif de la population en raison de la façon dont il a été créé. Sur les 1620 questionnaires complétés, 23 ont été retirés en raison du manque d'information et de l'incomplétude de certaines réponses. De cette façon, cette enquête a abouti à 1597 observations.

2.2.4 Méthodologie

2.2.4.1 Classification par K-moyennes

La classification automatique (clustering) est le processus de regroupement d'un ensemble donné de points selon leur niveau de similarité. En d'autres termes, l'objectif est de créer des groupes de données présentant des caractéristiques similaires et de les placer dans des groupes spécifiques. Trouver ces groupes est l'objectif de la méthode par K-moyennes, la variable K représentant le nombre de groupes. Sur la base des caractéristiques des données, cette méthode attribue de manière itérative chaque point de données à l'un des K groupes. Les résultats de l'application de l'algorithme à un ensemble de données incluent des centroïdes pour chacun des K groupes trouvés dans l'ensemble de données (ou K centroïdes) ainsi qu'une étiquette indiquant le numéro du groupe auquel appartient chaque point de l'ensemble de données.

Supposons que nous ayons un ensemble de données, D , qui contient n points dans l'espace euclidien. La méthode de clustering par K -moyennes distribue les points de D en K groupes, (C_1, \dots, C_K) , de manière que $C_i \subset D$ et $C_i \cap C_j = \emptyset$. Pour que les objets à l'intérieur d'un groupe soient similaires mais différents des objets des autres groupes, la qualité de la distribution est évaluée à l'aide d'une fonction objective. En d'autres termes, une forte similarité intra-groupe et une faible similarité inter-groupe est le but de cette fonction objective. Le centre de gravité d'un groupe, c_i , est utilisé comme représentation de ce groupe dans la méthode des K -moyennes. Dans cette méthode, le centroïde est égal à la moyenne des points de chaque groupe. Nous pouvons maintenant calculer la différence entre chaque point, $p \in C_i$, et son centre de groupe respectif, c_i . Ensuite, la variation intra-groupe, qui est la somme de l'erreur quadratique entre tous les objets dans C_i et le centroïde c_i , peut être utilisée pour évaluer la qualité du groupement. Ainsi, l'équation de la somme de l'erreur quadratique de tous les objets de l'ensemble de données est égale à (Han, Kamber et Pei, 2011) :

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{p \in c_i} |p - c_i|^2 \quad (1)$$

Dans l'équation (1), la distance entre chaque point et son centre d'agrégat est au carré, puis toutes les distances sont additionnées. Le but de cette fonction est de produire K groupes qui sont aussi compacts et distincts que possible. Trouver le point optimal de cette fonction objective est un problème NP-hard même pour une valeur générale de K dans l'espace euclidien bidimensionnel. Cependant, avec un nombre fixe de groupes (K) et une dimensionnalité fixe de l'espace, le problème peut être résolu (Han et al., 2011).

2.2.4.2 *Modèle logit multinomial*

Dans cette étude, la probabilité d'appartenir à un groupe dépend de l'utilité de ce groupe pour chaque individu. Les utilités de l'individu peuvent potentiellement être affectées par différents attributs et théoriquement, les déterminants de l'appartenance à un certain groupe sont identifiés par les différences entre les utilités des alternatives disponibles (ici, les groupes).

Dans cette recherche, la probabilité d'appartenir à un groupe est modélisée à l'aide d'un modèle logit multinomial. En supposant que chaque individu a un ensemble de choix réalisables montrés par C_n , le nombre de choix réalisables peut être défini comme $J_n \leq J$. De cette façon, la probabilité que l'alternative i dans C_n soit choisie par l'individu n peut être énoncée comme suit (Ben-Akiva, Lerman, & Lerman, 1985):

$$P_n(i) = Pr(U_{in} \geq U_{jn}, \forall j \in C_n) \quad (2)$$

La dérivation de la formule du modèle MNL est expliquée en détail par Ben-Akiva et al. (1985). En bref, dans les modèles MNL, la formule finale pour calculer la probabilité que l'alternative i soit choisie par l'individu n (ou que l'individu n appartienne à un groupe donné) est exprimée par l'équation 3 (Ben-Akiva et al., 1985):

$$P_n(i) = \frac{e^{V_{in}}}{\sum_{j \in C_n} e^{V_{jn}}} \quad (3)$$

où le numérateur est l'exponentielle de l'utilité de l'alternative i , et le dénominateur est la somme des exponentielles des utilités de toutes les alternatives.

2.2.5 Résultats et discussion

2.2.5.1 Classification par K-moyennes

Dans cette recherche, nous avons utilisé la méthode de regroupement des K-moyennes pour catégoriser le comportement de déplacement anticipé des individus après la COVID-19. En fait, nous avons demandé aux répondants s'ils anticipaient se déplacer plus, moins ou comme avant la COVID lorsque la pandémie sera terminée. En plus du changement général dans la fréquence des déplacements, nous avons également interrogé les personnes quant à leur fréquence anticipée d'utilisation de différents modes (à pied, à vélo, en transport en commun et en voiture). Notez que dans les questions spécifiques au mode, il existe également une quatrième alternative que les répondants peuvent choisir à savoir ne jamais utiliser un mode donné.

Aux fins du regroupement, nous avons attribué une valeur à chacune des réponses en ce qui concerne le niveau de fréquence de déplacement anticipé après la COVID-19. Pour les personnes qui anticipent se déplacer moins fréquemment, nous avons attribué -1, +1 pour celles qui anticipent se déplacer plus fréquemment et 0 pour celles qui n'utilisent jamais un mode ou qui n'anticipent pas changer leur fréquence d'utilisation. De cette façon, chaque répondant hérite d'une chaîne composée de cinq chiffres consécutifs qui décrit la fréquence anticipée de déplacement dans l'ère post-COVID ainsi que la fréquence anticipée d'utilisation des différents modes. Par exemple, une chaîne de (0, 1, 1, -1, 0) indique que la personne se déplacera aussi souvent qu'avant la pandémie, tout en utilisant plus de marche et de vélo, moins de transport en commun et le même niveau de voiture. À l'aide de ces cinq fréquences de déplacement, nous avons regroupé les individus à l'aide de la méthode des k-moyennes.

La première étape de la méthode d'agrégation des k-moyennes consiste à choisir le nombre de groupes, K . À cette fin, nous avons utilisé la méthode du coude. La méthode du coude est une méthode qui est généralement utilisée pour sélectionner le nombre approprié de groupes. Il calcule la somme des carrés à l'intérieur du groupe (WCSS) qui est essentiellement la somme de la distance au carré entre chaque point et le centroïde du groupe d'appartenance. En traçant le WCSS pour différentes valeurs de K , nous observons que pendant que le K augmente le WCSS diminue. Le graphique résultant a une forte pente négative au début (c.-à-d. de petites valeurs K), cependant, à mesure que le K augmente, la pente est réduite et le graphique devient presque parallèle à l'axe des x . En observant le tracé, nous pouvons déterminer un K spécifique pour lequel la pente du graphe se réduit soudainement. Ce point est appelé le point du coude et correspond au nombre optimal de groupes que nous pouvons considérer. La Figure 2-1 montre les différentes valeurs de WCSS correspondant à différentes valeurs de K pour les données de l'enquête COVID 2020.

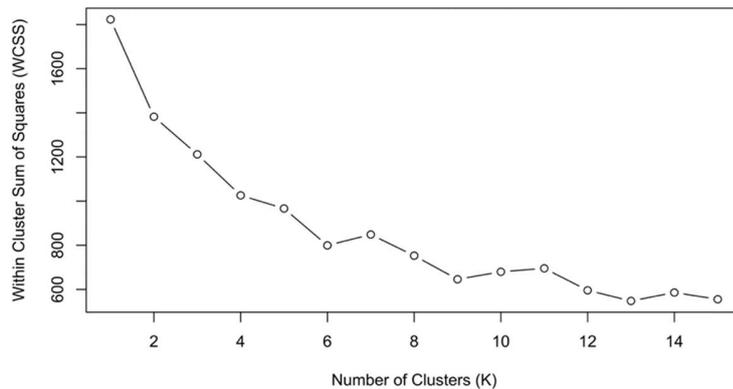


Figure 2-1. WCSS de différentes valeurs K pour les données de l'enquête COVID 2020

Selon cette figure, le nombre optimal de groupes - ou le point de coude - pour les données de l'enquête COVID 2020 est égal à quatre. Le Tableau 2-1 présente les centres de cluster ainsi que le nombre de cas dans chaque grappe avec K = 4 pour les données de l'enquête COVID 2020.

Tableau 2-1. Centres de cluster de l'enquête COVID 2020 (K = 4)

Fréquences	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4
Fréquence des déplacements	-0.24	-0.64	-0.60	0.34
Fréquence de marche	0.09	0.52	-0.03	0.24
Fréquence des bicyclettes	-0.01	0.80	-0.06	0.75
Fréquence de transit	0.02	-0.85	-1.00	-0.01
Fréquence des voitures	-0.11	-0.17	0.13	-0.18
Nombre de cas (Total = 1597)	851	319	287	140
Pourcentage de cas (%)	53	20	18	9

Afin de mieux voir les différences entre les quatre grappes résultantes, le graphique des agrégats centers est fourni par la Figure 2-1.

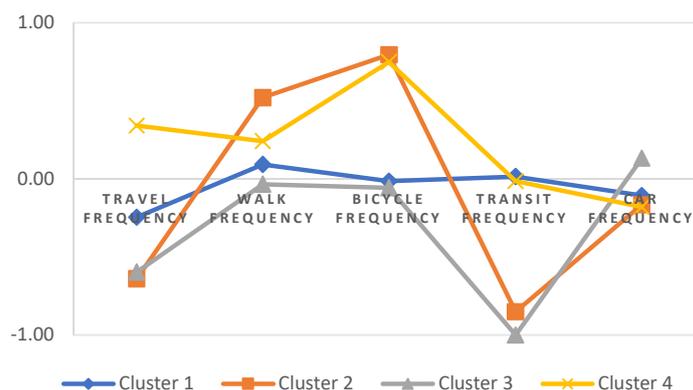


Figure 2-2. Diagramme des centres de clusters pour chacun des quatre clusters de l'enquête COVID 2020

Le premier groupe représente les répondants qui ont déclaré qu'ils se déplaceraient de la même façon qu'avant le début de la pandémie. Les deuxième et troisième groupes appartiennent aux personnes qui ont mentionné qu'elles se déplaceraient moins fréquemment dans la période post-

COVID. Ces personnes ont également déclaré qu'elles utiliseraient moins le transport en commun après la COVID. La seule différence entre ces deux groupes réside dans leur niveau anticipé d'utilisation des modes actifs. Les membres du groupe 2 sont plus enclins à utiliser les modes de transport actifs (marche et vélo) avec des niveaux d'utilisation plus élevés par rapport à avant la COVID, tandis que les membres du groupe 3 utiliseront les modes actifs de la même manière qu'avant la pandémie. Enfin, le quatrième groupe est le représentant des personnes qui anticipent se déplacer plus fréquemment dans la période post-COVID. De plus, celles-ci utiliseront également des modes de transport actifs à une fréquence plus élevée après la pandémie. Afin de mieux comprendre les caractéristiques les plus importantes de chaque grappe et pour faciliter leur référencement dans le reste du document, nous avons décidé d'attribuer un nom à chacun des groupes. Les noms attribués sont les suivants :

- Groupe 1 : Statu quo
- Groupe 2 : Utilisateurs de modes actifs ayant une fréquence de déplacement et une utilisation du transport en commun anticipées plus faibles
- Groupe 3 : Réduction de la fréquence des trajets et de l'utilisation du transport en commun
- Groupe 4 : Utilisateurs de modes actifs avec une fréquence de déplacement plus élevée

2.2.5.2 *Modèle logit multinomial*

Le Tableau 2-2 présente les résultats de l'estimation des coefficients du modèle logistique multinomial ainsi que des statistiques du test t et de la valeur de p de chaque variable. Pour éviter les problèmes de colinéarité et d'endogénéité dans le modèle, la corrélation entre les variables a été calculée et les variables d'entrée du modèle sélectionnées en fonction des résultats des calculs. Étant donné que la base de données comprend à la fois des variables continues et des variables catégorielles, différents types de corrélation ont été utilisés en fonction des caractéristiques des données. Pour la corrélation entre deux variables continues, le coefficient de corrélation de Pearson a été utilisé tandis que pour la corrélation entre deux variables catégorielles, le test du Khi deux a été utilisé. Pour la corrélation entre une variable continue et une variable catégorielle, le test ANOVA a été utilisé. La méthode d'estimation du maximum de vraisemblance (MLE) est utilisée pour ajuster le modèle MNL, ce qui signifie que les estimations des paramètres sont celles qui maximisent la probabilité des données observées. L'une des mesures de la qualité de l'ajustement qui est rapportée pour les modèles MNL est le R au carré de McFadden. Cette mesure est définie comme suit :

$$R_{McFadden}^2 = 1 - \frac{\text{LogLikelihood}_{\text{Fitted model}}}{\text{LogLikelihood}_{\text{Null model}}} \quad (4)$$

Dans l'équation (4), le numérateur de la fraction est la valeur logLikelihood pour le modèle ajusté tandis que le dénominateur est la valeur LogLikelihood qui correspond au modèle nul. Le modèle Null réfère à un modèle avec une seule ordonnée à l'origine et aucune autre variable. Comme la plage de la fonction LogLikelihood est $(-\infty, 0)$, la plage des McFadden R^2 est comprise entre zéro et un, exactement similaire à la valeur R^2 d'une régression linéaire. Toutefois, la régression logistique est utilisée pour modéliser des variables dépendantes discrètes. Deux des autres critères de sélection du modèle sont le critère d'information Akaike (AIC) et le critère d'information bayésien (BIC). L'AIC (Akaike, 1974) utilise l'ajustement dans l'échantillon pour calculer la probabilité qu'un modèle prédise ou estime avec précision les valeurs futures. Le modèle avec l'AIC le plus bas parmi l'ensemble des modèles est un bon modèle. Le BIC évalue le

compromis entre l'ajustement du modèle et la complexité (Stone, 1979). À l'instar de l'AIC, un ajustement amélioré est indiqué par une valeur BIC plus faible. Trois niveaux de significativité ont été considérés pour les résultats du Tableau 2-2: les coefficients avec une valeur de p inférieure à 0,01 sont notés avec trois étoiles, les coefficients avec une valeur de p comprise entre 0,01 et 0,05 sont notés avec deux étoiles, et les coefficients avec une valeur de p comprise entre 0,05 et 0,10 sont notés avec une étoile. De plus, dans le processus d'estimation du modèle logit multinomial, la constante pour la fonction d'utilité du premier cluster est normalisée à zéro afin qu'elle soit identifiable (Bierlaire, 2020).

Selon les résultats présentés au Tableau 2-2, le coefficient estimé lié à l'âge ≥ 65 ans dans le premier groupe a une valeur positive significative de 0,487 avec une valeur de p de 0,031. Cela signifie que les personnes âgées de ≥ 65 ans sont plus enclines à anticiper ne pas modifier leur fréquence de déplacement. Ce groupe d'âge (≥ 65 ans) est également négativement significatif pour le deuxième groupe avec une valeur estimée de -0,956 et une valeur de p de 0,016. Il indique que le fait de faire partie de ce groupe d'âge diminue la probabilité d'appartenir à une cohorte qui prévoit se déplacer moins fréquemment et avoir une utilisation plus faible du transport en commun tout en utilisant davantage les modes actifs. Dans le troisième groupe, les trois groupes d'âge sont statistiquement significatifs avec des valeurs de p inférieures à 0,01. De plus, les coefficients estimés pour les trois groupes d'âge du troisième groupe sont positifs, le groupe d'âge [25, 40 ans] ayant l'effet le plus faible et le groupe d'âge ≥ 65 ans ayant l'effet le plus élevé. Cela confirme les conclusions d'Ergin (2022) qui a constaté qu'à mesure que l'âge augmente, le niveau d'utilisation des transports en commun diminue (Ergin, 2022). Il est également conforme aux conclusions de Kopsidas et al. (2021) qui ont signalé que les voyageurs âgés de 46 à 65 ans sont moins susceptibles d'utiliser les transports en commun (Kopsidas, Milioti, Kepaptsoglou, & Vlachogianni, 2021).

En ce qui concerne les résultats de l'âge dans le quatrième groupe, le modèle montre que le fait d'appartenir aux groupes d'âge [25, 40] et [40, 65 ans] réduit la probabilité d'appartenir à ce groupe et donc d'anticiper se déplacer plus fréquemment qu'avant la COVID et d'utiliser davantage les modes actifs.

On a observé que la variable nominale du sexe masculin n'avait pas d'impact significatif sur l'appartenance à une cohorte comportementale. Dans une étude similaire, Ergin (2022) a constaté que les femmes préfèrent utiliser les transports en commun plus que les hommes (Ergin, 2022). Cependant, notre étude ne fournit aucun aperçu de l'effet du sexe sur l'appartenance aux groupes, puisque tous les coefficients estimés pour la variable de genre sont non-significatifs.

Les ménages comptant deux personnes ou plus ont un rôle négatif important pour l'appartenance au premier groupe. En fait, les ménages de la taille ≥ 2 anticipent moins se déplacer selon la même fréquence qu'avant la COVID. Nous pouvons interpréter ce résultat d'une manière inverse. Nous pouvons dire que le fait d'être dans un ménage d'une seule personne augmente la probabilité de maintenir le statu quo quant à la fréquence des déplacements.

Le revenu du ménage a été classé en trois groupes: moins de 60k \$, entre 60k \$ et 120k \$, et plus de 120k \$. Dans notre modèle, avoir un revenu du ménage inférieur à 60k \$ est associé à une probabilité négative d'appartenir au deuxième groupe. En d'autres termes, être dans un ménage avec un revenu annuel $< 60k$ \$, réduit la probabilité d'être dans le groupe cohorte qui anticipe se déplacer moins fréquemment et utiliser moins le transport en commun, tout en utilisant davantage les modes actifs après la pandémie. À cet égard, Ergin (2022) a indiqué que le fait d'avoir un faible niveau de revenu augmente la tendance à utiliser les transports en commun

(Ergin, 2022). Sa conclusion contraste avec nos résultats; cependant, notre conclusion pourrait être attribuée à l'utilisation des modes actifs qui fait partie des caractéristiques du deuxième groupe.

La variable nominale d'un ménage qui prévoit déménager dans un proche avenir est également incluse dans le modèle et est significative pour les trois premiers groupes. Pour le premier groupe, cette variable a une valeur de -0,421, ce qui indique que le fait de questionner son lieu de résidence diminue la probabilité d'être dans le groupe de personnes dites « statu quo ». Dans le deuxième groupe, le coefficient estimé est égal à 0,234 avec une valeur de p de 0,031, ce qui indique que les ménages qui prévoient déménager sont plus susceptibles de se déplacer et d'utiliser le transport en commun moins qu'avant la pandémie tout en utilisant des modes plus actifs après la pandémie. En ce qui concerne le troisième groupe qui appartient à ceux qui s'attendaient à avoir une fréquence de déplacement et une utilisation des transports en commun plus faibles, le coefficient estimé est également statistiquement significatif avec une valeur de 0,191 et une valeur de p de 0,088. Cela indique qu'il est plus probable que ceux qui prévoient déménager appartiennent au groupe qui prévoient se déplacer moins fréquemment et utiliser moins le transport en commun dans l'après-COVID par rapport à l'avant-COVID. La variable nominale relative aux déménagements n'est pas statistiquement significative pour le quatrième groupe.

On a observé qu'avoir un abonnement au transport en commun était statistiquement significatif dans les quatre groupes avec une valeur de p inférieure à 0,01. Dans le premier et le quatrième groupes, le coefficient estimé est négatif tandis que dans les deuxième et troisième groupes, il est positif. Cela signifie que le fait d'avoir un abonnement de transport en commun diminue à la fois la probabilité d'appartenir à la cohorte qui anticipe le statu quo après la COVID et la probabilité d'appartenir à la cohorte qui anticipe se déplacer plus fréquemment avec un niveau plus élevé d'utilisation des modes actifs. D'autre part, le fait d'avoir un abonnement de transport en commun augmente la probabilité d'appartenir au groupe d'utilisateurs des modes actifs anticipant une fréquence de déplacement et une utilisation du transport en commun plus faibles (groupe 2), et au groupe de ceux dont la fréquence de déplacement et l'utilisation du transport en commun sont anticipées sont plus faibles (groupe 3).

L'effet de la pandémie de COVID-19 sur l'importance des questions environnementales et du changement climatique pour les individus est également étudié dans notre recherche. Dans le sondage, nous avons demandé aux répondants : « La pandémie a-t-elle changé l'importance que vous accordez aux questions environnementales et au changement climatique? ». Il y a quatre réponses à cette question dans notre sondage :

- « Oui, c'est encore plus important »
- « Oui, mais d'autres questions sont maintenant plus importantes »
- « Non, ces questions ont toujours été importantes »
- « Non, ce ne sont pas des questions importantes »

Nous avons testé les quatre variables dans notre processus de modélisation, cependant, seule la variable nominale qui est liée à ceux qui ont répondu « Oui, c'est encore plus important » s'est avérée statistiquement significative. En fait, elle est statistiquement significative pour les quatre groupes. Fait intéressant, ceux qui ont déclaré que la pandémie les a amenés à attacher un niveau plus élevé d'importance aux questions environnementales et aux changements climatiques sont plus susceptibles d'utiliser des modes de transport actifs. Plus en détail, cette variable a une valeur

négative pour le premier et le troisième groupe tout en ayant une valeur positive pour le deuxième et le quatrième groupe.

La propriété du logement est également importante pour tous les groupes, à l'exception du second groupe. Ceux qui sont propriétaires de leur logement sont plus enclins à appartenir au premier groupe, qui sont de type « statu quo », et au troisième groupe, qui sont ceux qui prévoient une fréquence de déplacement et une utilisation du transport en commun plus faibles dans le monde post-COVID. Au contraire, le fait d'être propriétaire du logement est associé à une probabilité plus faible de voyager plus fréquemment et d'utiliser davantage les modes de transport actifs (c.-à-d. le quatrième groupe).

La variable nominale associée à l'abonnement au service d'autopartage s'avère statistiquement significative seulement pour le deuxième groupe. Le coefficient estimé de cette variable est de 0,233 avec une valeur de p de 0,067, ce qui indique que ceux qui ont une adhésion à l'autopartage sont plus susceptibles de faire partie de la cohorte des utilisateurs des modes actifs ayant une fréquence de déplacement et une utilisation du transport en commun plus faibles (comportements anticipés).

Posséder un vélo est une autre variable nominale dans notre modèle qui est statistiquement significative pour les trois premiers groupes. Selon les résultats de l'estimation du modèle, posséder un vélo se traduit par une probabilité plus faible d'appartenir au premier groupe (statu quo) et au troisième groupe (utilisateurs prévoyant se déplacer moins fréquemment moins utiliser le transport en commun), tandis que cela se traduit par une probabilité plus élevée d'appartenir au groupe qui prévoit se déplacer moins fréquemment, moins utiliser le transport en commun et davantage utiliser les modes actifs après la COVID (le deuxième groupe).

Les résultats de notre estimation impliquent que la variable nominale d'avoir deux voitures ou plus dans le ménage n'est statistiquement significative que pour le deuxième groupe, avec un coefficient estimé de -0,363 et une valeur de p de 0,009. Cela indique que les ménages ayant deux voitures ou plus sont moins susceptibles de faire partie du groupe qui comprend les utilisateurs des modes actifs ayant une fréquence anticipée de déplacement et une utilisation anticipée du transport en commun plus faibles.

Finalement, il a été constaté que les personnes qui ne possèdent pas de téléphone cellulaire sont plus enclines à anticiper conserver leurs habitudes de voyage antérieures à la COVID après la pandémie, car le coefficient estimé de la variable connexe (Ne pas avoir de téléphone cellulaire) n'est statistiquement significatif que pour le premier groupe avec une valeur de paramètre de 0,346 et une valeur de p de 0,066.

La valeur du Null LogLikelihood dans notre modèle est égale à -2213.912. Au cours du processus de modélisation, nous avons pu augmenter la valeur du Loglikelihood de -2213,912 à -1750. 693. En utilisant ces valeurs, le pseudo-R² de McFadden est égal à 0.209. Selon McFadden (1977), "les valeurs de 0,2 à 0,4 pour p² représentent un excellent ajustement" (McFadden, 1977). Ainsi, le pseudo-R² de notre modèle est considéré comme excellent.

Tableau 2-2. Résultats du modèle de régression logistique avec les données de l'enquête COVID 2020

Variables	Cluster 1: Status quo		Cluster 2: Active modes users with lower trip frequency & transit use		Cluster 3: Lower trip frequency & transit use		Cluster 4: Active modes users with higher trip frequency					
	Value	t-test p-value	Value	t-test p-value	Value	t-test p-value	Value	t-test p-value				
Alternative-specific constant	0.000	NA	-2.34	-6.26	0.000***	-2.78	-6.68	0.000***	-1.32	-2.97	0.003***	
Age [25, 40)	-0.067	-0.46	0.649	-0.074	-0.40	0.689	0.661	2.93	0.003***	-0.520	-2.36	0.018**
Age [40, 65)	-0.003	-0.02	0.985	-0.022	-0.11	0.909	0.833	3.65	0.000***	-0.808	-3.46	0.001***
Age ≥ 65	0.487	2.16	0.031**	-0.956	-2.41	0.016**	0.991	3.04	0.002***	-0.522	-1.44	0.149
Gender, male	0.113	1.36	0.173	-0.067	-0.62	0.534	-0.103	-0.95	0.342	0.057	0.40	0.687
Household size ≥ 2	-0.218	-1.99	0.047**	0.063	0.44	0.662	0.217	1.45	0.148	-0.063	-0.34	0.734
Household income < 60k \$	0.055	0.50	0.615	-0.320	-2.16	0.031**	0.022	0.15	0.882	0.244	1.36	0.175
Household plan to move	-0.421	-4.76	0.000***	0.234	2.16	0.031**	0.191	1.70	0.088*	-0.005	-0.03	0.975
Transit pass owner	-0.382	-4.38	0.000***	0.476	4.09	0.000***	0.451	3.57	0.000***	-0.544	-3.76	0.000***
Environmental importance – yes, more	-0.340	-3.65	0.000***	0.313	2.81	0.005***	-0.334	-2.74	0.006**	0.360	2.43	0.015**
Ownership of the dwelling	0.164	1.66	0.097*	-0.121	-0.98	0.327	0.327	2.56	0.010**	-0.370	-2.22	0.026**
Carsharing membership	-0.152	-1.38	0.168	0.233	1.83	0.067*	0.021	0.15	0.881	-0.103	-0.56	0.579
Bicycle ownership	-0.170	-1.78	0.076*	0.660	4.77	0.000***	-0.299	-2.41	0.016**	-0.191	-1.20	0.228
Household number of cars ≥ 2	0.071	0.67	0.506	-0.363	-2.61	0.009**	0.192	1.41	0.159	0.101	0.54	0.591
Having no cellphone	0.346	1.84	0.066*	-0.393	-1.24	0.216	0.081	0.33	0.744	-0.034	-0.09	0.925
Null LogLikelihood	-2213.912											
Initial LogLikelihood	-2213.912											
Final LogLikelihood	-1750.693											
McFadden's pseudo-R ²	0.209											
Akaike Information Criterion (AIC)	3619.386											
Bayesian Information Criterion (BIC)	3936.563											
Number of observations	1597											

2.2.6 Conclusion

Cette section présente les résultats de l'analyse des comportements de déplacement anticipés des individus dans la période post-COVID. Cette étude enrichit l'ensemble des connaissances de deux manières : premièrement, elle examine les différences de comportement de déplacement parmi les personnes en fonction de leurs caractéristiques de déplacement, puis les catégorise en conséquence. Deuxièmement, il crée un modèle économétrique micro-comportemental des comportements de voyage anticipés après la COVID-19 et identifie les facteurs influençant ces comportements. Dans la première étape, nous avons classé les individus en fonction de leur niveau d'utilisation anticipé de chaque mode de transport dans l'ère post-COVID en utilisant la méthode de classification des k-moyennes. Ensuite, nous avons modélisé leurs choix anticipés et identifié les déterminants de l'appartenance à chaque catégorie en utilisant des modèles logit multinomiaux. De cette façon, nous avons pu connaître les préférences de mode de déplacement de chaque groupe concernant la façon dont ils prévoient faire leurs activités quotidiennes.

Les quatre groupes résultant de cette enquête sont 1) les utilisateurs en statu quo, 2) les utilisateurs en mode actif avec une fréquence de déplacement et une utilisation du transport en commun plus faibles, 3) les utilisateurs avec une fréquence de déplacement et une utilisation du transport en commun plus faibles, et 4) les utilisateurs en mode actif avec une fréquence de déplacement plus élevée. Selon les résultats du modèle logit multinomial, avoir un âge ≥ 65 ans, être propriétaire de son logement et ne pas avoir de cellulaire augmente la probabilité d'appartenir au premier groupe qui sont les voyageurs statu quo. En revanche, être dans un ménage de deux personnes ou plus, avoir un projet de déménagement dans un futur proche, posséder un titre de transport en commun, l'importance des enjeux environnementaux et posséder un vélo diminuent la probabilité d'appartenir au premier groupe. Le fait de questionner son lieu de résidence, la possession d'un laissez-passer de transport en commun, l'importance des questions environnementales, l'adhésion à l'autopartage et la possession d'un vélo augmentent la probabilité d'appartenir au deuxième groupe qui comprend les personnes qui ont déclaré que, par rapport à l'avant-COVID, ils voyageront avec une fréquence plus faible et utiliseront moins de transport en commun tout en utilisant davantage les modes actifs après la COVID-19. Être dans le groupe d'âge ≥ 65 ans, avoir un revenu annuel inférieur à 60k \$ et la présence de deux voitures ou plus dans le ménage diminuent la probabilité d'être dans le deuxième groupe. Les variables qui augmentent la probabilité d'appartenir au troisième groupe sont le fait de questionner son lieu de résidence, posséder un abonnement au transport en commun et être propriétaire du logement ainsi que les trois groupes d'âge. De plus, l'importance des enjeux environnementaux et la possession d'un vélo diminuent la probabilité d'appartenir à la cohorte d'individus prévoyant avoir une fréquence de déplacement et une utilisation des transports en commun moindres. L'importance des problèmes environnementaux augmente la probabilité d'appartenir au dernier groupe qui comprend ceux qui anticipent voyager avec une fréquence et un niveau d'utilisation des modes actifs plus élevés qu'avant la COVID. De plus, être dans les tranches d'âge [25, 40) et [40, 65] ans, posséder un titre de transport en commun et être propriétaire de son logement réduisent la probabilité d'appartenir à ce groupe.

Cette étude peut être utilisée pour développer des méthodes de prévision afin d'anticiper les habitudes de déplacement des personnes dans la région métropolitaine de Montréal. Il offre des informations cruciales sur les changements prévus dans la fréquence des déplacements, l'utilisation du transport en commun et l'utilisation des vélos tout au long de l'ère post-pandémique. Les conclusions de cette étude peuvent aider à concevoir des politiques efficaces qui encouragent les déplacements actifs et améliorent l'expérience des usagers du transport en

commun. En conclusion, les résultats de l'étude aideront les planificateurs à créer des plans qui permettront de mieux se préparer à l'ère post-pandémique en tenant compte des changements prévus dans les habitudes de déplacement des gens.

2.3 Vulnérabilité des réseaux de transport en commun

- Par : Kaveh Rezvani, doctorat
- Supervision : Pre Catherine Morency
- Contexte : Chaire Mobilité / Transition
- Fin prévue : décembre 2024

2.3.1 Introduction

Les systèmes de transport public (STP) jouent un rôle important dans la vie quotidienne des gens. Le réseau de métro urbain (RMU) est l'un des fondements du STP dans les grandes métropoles, contribuant de manière significative à la mobilité efficace des passagers. Ainsi, le fonctionnement fiable de ce système est une préoccupation permanente des autorités. Un large éventail d'événements tels que des incidents, des problèmes techniques, des comportements humains ou autres, ont un impact sur les performances des RMU, entraînant des retards qui peuvent se traduire par des pertes de temps importantes et des coûts importants pour les opérateurs et les utilisateurs. La ville de New York (2017) a publié une estimation sommaire des conséquences économiques à grande échelle des retards du métro. L'analyse a estimé que les pertes de la ville en 2016 se situaient entre 170 et 389 millions de dollars en fonction de l'achalandage, de la durée des retards et d'un salaire horaire moyen de 34 dollars (Stringer, 2017). Les perturbations ferroviaires imprévues sont assez courantes dans les grandes villes, ce qui est considéré comme l'un des principaux facteurs de retards dans les RMU. Selon les données sur les perturbations du métro, en 2015, le système de métro de Toronto géré par la TTC a connu 144 perturbations (Itani and Shalaby 2021).

La fréquence des perturbations dans les RMU et leur impact socio-économique considérable sur les sociétés ont été abordés dans plusieurs articles (Wu, Dong et al. 2018) (Xu and Li 2019) (Wang and Tian 2020), (Wu, Chen et al. 2021). Ils ont proposé une analyse de vulnérabilité et de robustesse des RMU. Bien que diverses méthodes aient été employées dans les recherches menées et que des résultats impressionnants aient été obtenus, certaines caractéristiques clés sont négligées.

Dans des recherches antérieures, les articles considèrent rarement l'infrastructure du réseau qui peut avoir des impacts significatifs sur la validité de l'analyse de vulnérabilité topologique. Dans cette recherche, nous contribuons à combler cette lacune. L'objectif principal de cette recherche est de démontrer comment la prise en compte des caractéristiques de l'infrastructure des RMU améliorera les résultats de l'évaluation de la vulnérabilité.

2.3.2 Contexte

La vulnérabilité est un concept relativement nouveau dans le domaine de l'ingénierie des transports et il n'en existe pas de définition unanimement acceptée. Cependant, ses origines en tant que sujet de recherche remontent à Berdica (2002) et D'este et Taylor (2003). Berdica a défini la vulnérabilité des réseaux de transport comme "une susceptibilité aux incidents qui peut entraîner des réductions considérables de l'état de fonctionnement du réseau routier" (Berdica, 2002). Cette définition a été généralisée par différents chercheurs au cours de la dernière décennie (voir par exemple Jenelius, Petersen et al., 2006; Berdica and Mattsson, 2007 ; et Jenelius and Mattsson, 2012). Un autre terme connexe qui a suscité une attention considérable dans ce domaine de l'ingénierie des transports ces dernières années est la robustesse qui est utilisée par rapport au terme vulnérabilité. En d'autres termes, la vulnérabilité d'un réseau diminue avec l'augmentation de la robustesse. Ce terme doit son émergence à Scott, Novak et al.

(2006) lorsque l'indice de robustesse du réseau (NRI) a été défini. Ensuite, Sullivan, Novak et al. (2010) ont défini la robustesse du réseau comme "la mesure selon laquelle le réseau de transport peut fonctionner en présence de diverses perturbations de capacité sur les liens le composant". Les définitions suivantes ont été présentées par Snelder, Van Zuylen et al. (2012) et de Oliveira, da Silva Portugal et al. (2016).

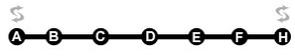
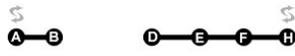
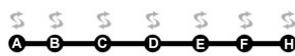
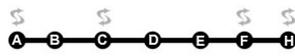
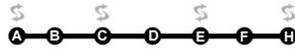
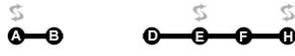
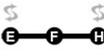
En utilisant la science des systèmes et la théorie des réseaux complexes, Zhang and Wang (2019) ont extrait la structure topologique du réseau du métro de Nanjing pour analyser sa vulnérabilité. Cette recherche s'est concentrée sur deux stratégies : le retrait basé sur le degré et le retrait basé sur le volume d'embarquement, appelés respectivement LDNBA et HLNBA. De plus, dans cette recherche, une analyse de défaillance dynamique a été présentée dans laquelle il a été supposé que lorsqu'une gare est perturbée, les passagers de cette gare seront évacués vers ses gares voisines, ce qui était conceptuellement similaire à une défaillance en cascade dans Lu, Zhang et al. (2022). Zhu, Liu et al. (2018) ont étudié topologiquement la robustesse de 5 réseaux de métro à travers le monde. La taille relative du premier composant connecté géant (GCC) a été considérée comme l'indicateur de robustesse, et sept stratégies de défaillance ciblées, y compris le degré de centralité, la centralité intermédiaire, le coefficient de fracture, l'influence collective, la méthode de décomposition K-shell, les niveaux de coefficient d'attaque basé sur l'arbre, et le coefficient d'arbre de largeur ont été utilisés. La stratégie d'échec aléatoire a également été utilisée dans cette recherche. Les résultats de cette recherche ont montré que la stratégie d'échec la plus efficace est la stratégie classique de centralité la plus élevée. Zhang, Wang et al. (2018) en utilisant le réseau complexe, ont analysé et comparé la vulnérabilité du réseau de métro dans trois villes (Shanghai, Pékin et Guangzhou) en Chine. Cette recherche s'est concentrée uniquement sur les défaillances ciblées ; l'élimination (des stations) basée sur le degré et sur l'intermédiarité a été utilisée dans cette recherche. Wang, Koç et al. (2017) ont quantifié et comparé la robustesse de 33 réseaux de métro dans le monde. Ils ont utilisé à la fois une stratégie aléatoire et ciblée (suppression des stations basée sur le degré). Dans cette recherche, dix indicateurs de robustesse ont été calculés pour chaque réseau.

La principale lacune dans l'évaluation de la vulnérabilité du RMU est liée à une hypothèse erronée largement observée dans les études d'évaluation topologique. Le manque de recherche consiste à ignorer les caractéristiques infrastructurelles et opérationnelles des RMU, différenciant l'analyse du réseau de transport en commun d'une analyse graphique pure. Plus précisément, il faut savoir que selon l'infrastructure des systèmes de métro, dans la grande majorité des systèmes de métro, les trains ne peuvent pas changer de direction dans toutes les stations. Les installations de changement de direction (DCF) sont installées uniquement dans des stations spécifiques. En attendant, il est à noter que l'ajout de telles installations à une station nécessite une opération de construction difficile, telle que le creusement d'un tunnel nécessitant un investissement considérable en temps et en argent. De plus, si ces installations veulent être ajoutées au système après l'ouverture de la ligne, les opérations de construction doivent être limitées aux heures (par exemple, de 1 h à 5 h) pendant lesquelles la ligne ne fonctionne pas. En conséquence, il est pratiquement impossible d'ajouter de telles installations à toutes les stations d'un système.

La base du mécanisme de défaillance de nœud est que si un nœud est interrompu, ce nœud et ses liens connectés sont supprimés du réseau (Li, Guo et al. 2018), et on suppose généralement que le reste du réseau qui n'a pas encore été supprimé continue à fonctionner comme avant. Cependant, cette hypothèse ne peut être correcte que lorsque la possibilité de changer de direction est disponible dans toutes les stations. Car lorsque le conducteur de la locomotive est

informé que la gare suivante est perturbée, le conducteur peut revenir aux gares précédentes en changeant de direction. Alors que l'absence de possibilité de changement de sens dans les gares fait que même lorsqu'il y a une gare perturbée, en quelques minutes tous les trains dans le sens où ils se déplaçaient atteindront la dernière gare libre, car la gare suivante est occupée par le train précédent. Le tableau ci-dessous présente plus de détails concernant le concept susmentionné.

Tableau 2-3 Rôle des SDCF dans une ligne de métro

	État normal Avant la perturbation	Gare perturbée	Après perturbation			
			Situation (2) : Immédiatement après la perturbation		Situation (3) : Quelques minutes après la perturbation	
Scénario #1		C				
Scénario #2		C				
Scénario #3		D				
Scénario #4		C				

Le Tableau 2-3 montre une ligne de métro hypothétique composée de 7 stations. Pour bien clarifier le rôle que jouent les stations avec installations de changement de direction (SCDF) dans les RMU, 4 scénarios sont définis. Pour chaque scénario, la ligne de métro est présentée dans 3 situations : état normal (avant la perturbation), immédiatement après la perturbation et quelques minutes après la perturbation.

- Scénario #1 : Seuls les terminaux sont SDCF. En supposant une perturbation dans la station C, on supprime d'abord cette station et les liens connectés (situation 2). Puis, comme le train ne peut pas revenir de B vers A, ou de D vers H, au bout de quelques minutes tous les trains doivent s'arrêter aux gares, et le réseau sera forcément complètement perturbé.
- Scénario #2 : Toutes les gares sont SDCF, ce qui signifie qu'après une perturbation dans la gare C, les trains peuvent facilement revenir de B à A, ou de D à H. Ainsi, le reste du réseau peut fonctionner comme avant.
- Scénario #3 : Les stations C, F et les terminaux sont SDCF. Après une perturbation en gare D, cette gare et les liaisons qui y sont reliées sont supprimées (situation 2), puis les trains ne pouvant revenir en H depuis E, la gare E est conséquemment perturbée. Par conséquent, deux segments : A à C et F à H peuvent continuer comme avant.
- Scénario #4 : Les terminaux et stations C et E sont SDCF. Si une perturbation se produit dans la station C, d'abord cette station et les liaisons connectées à la station sont supprimées (situation 2). Ensuite, puisque les trains ne peuvent pas revenir de B à A, cette section du réseau est conséquemment perturbée, et la section E à H est le seul segment qui peut continuer après une perturbation en gare C.

Dans les recherches précédentes, la deuxième situation est généralement considérée comme un réseau perturbé qui est un état instable. Les réseaux ne peuvent continuer à fonctionner que

quelques minutes dans de telles circonstances, et après quelques minutes, cela se transforme inévitablement en situation 3. Il n'est donc pas logique d'étudier la vulnérabilité des réseaux dans de telles circonstances. Cependant, comme les recherches précédentes ne considéraient pas les CDF, elles n'ont pas de conception de la situation 3, ce qui signifie que dans de telles recherches, seul un graphe est analysé au lieu d'un réseau ferroviaire réel. Cette question prend plus d'importance lorsque les auteurs tentent de comparer la vulnérabilité de certains RMU, car leurs résultats sont très différents de ce qui se passera dans le monde réel. De plus, le concept mentionné remet également en question la logique principale derrière les interruptions en cascade. Typiquement, après l'apparition d'une perturbation dans une gare, les passagers de la gare essaieront de se rendre dans les gares voisines (Chen, Zhang et al. 2021). Toutefois, selon le concept mentionné ci-dessus, cette hypothèse ne peut être correcte qu'une fois que les stations précédentes et suivantes ont des CDF. Sinon, en supprimant une station, toutes les stations en amont et en aval seront perturbées, et il n'est pas possible pour les passagers de les utiliser.

2.3.3 Méthodologie

2.3.3.1 Modélisation d'un RMU

Von Ferber, Holovatch et al. (2009) ont proposé une vue complète des systèmes de transport en commun en modélisant le système avec des topologies de réseau alternatives dans plusieurs espaces. Actuellement, l'une des techniques les plus utilisées pour représenter les structures topologiques des réseaux de transport en commun est l'espace L considérant le réseau comme un graphe. Ce graphique représente chaque station par un nœud, et un lien entre les nœuds indique qu'il existe au moins une route qui dessert consécutivement les stations correspondantes (Taylor 2017). Le réseau de métro sera formulé dans l'espace L comme suit :

$$G_M = (V_M, E_M)$$

$V_M = \{m_i\}_{i=1}^{N_M}$ fait référence à un ensemble de nœuds (c'est-à-dire des stations de métro)

$E_M = \{(m_i, m_j) \mid 1 \leq i, j \leq N_M, i \neq j\}$ est un ensemble d'arêtes, montrant la connectivité directe entre les stations.

$N_M = |V_M|$ est le nombre total de stations de métro.

Comment les caractéristiques infrastructurelles du système peuvent-elles affecter le modèle de RMU ?

Comme cela a été largement discuté dans la section 2, les stations avec des installations de changement de direction (SCDF) en tant que l'une des caractéristiques infrastructurelles les plus importantes du réseau, pourraient avoir un impact considérable sur les résultats de l'évaluation de la vulnérabilité des RMU. Pour considérer le rôle que ces installations jouent dans un réseau, nous avons défini des blocs ferroviaires. Chaque bloc se compose de gares consécutives et de troncs ferroviaires situés entre deux SCDF. Par exemple, dans le troisième scénario du Tableau 2-3, la ligne est composée de 3 cantons : le canton #1 est constitué des stations A, B et C ; le bloc #2 se compose des stations C, D, E et F ; le bloc #3 se compose des stations F et G. Comme on peut le voir, les SCDF appartiennent à tous les blocs connectés les uns aux autres par le SCDF.

2.3.3.2 Attributs topologiques fondamentaux de l'RMU

Le degré de nœud correspond au nombre total d'arêtes connectées. Le degré de nœud moyen d'un RMU est calculé par la formule ci-dessous :

$$\bar{k} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i$$

Où N est le nombre total de nœuds (stations) dans un RMU.

La *centralité d'intermédiarité* de V_i est représentée par B_i qui est la proportion de chemins les plus courts passant par le nœud i à tous les chemins reliant les nœuds.

$$B_i = \sum_{p \neq q \neq i} \frac{\tau_{pq}(i)}{\tau_{pq}}$$

Où : $\tau_{pq}(i)$ représente le nombre de plus courts chemins passant par le nœud i entre le nœud p et le nœud q , et représente le nombre de tous les plus courts chemins entre le nœud p et le nœud q qui peuvent être calculés dans un réseau non orienté par la formule suivante :

$$\tau_{pq} = \frac{(N-1) \times (N-2)}{2}$$

2.3.3.3 Indicateurs d'évaluation de la vulnérabilité

Taille relative du composant géant

En raison de perturbations, le réseau peut être divisé en plusieurs sous-graphes connectés. Le terme composant connexe géant fait référence au sous-graphe avec le plus grand ordre. Cet indicateur, qui est représenté par RSGC, évalue la vulnérabilité du RMU de l'URN du point de vue de la distance du réseau. Plus le RSGC est élevé, meilleure est la stabilité du réseau.

$$RSGS = \frac{N'}{N}$$

Où N représente la taille du composant géant après l'interruption de certains nœuds, et N est la taille d'origine du réseau.

Longueur moyenne du chemin

Le nombre d'arêtes entre deux nœuds peut être utilisé pour indiquer la longueur du chemin entre eux dans un réseau. Cet indicateur représenté par APL est lié à la distance moyenne entre une paire de nœud et est lié à la distance moyenne entre une paire de nœuds dans la composante géante. Plus l'APL est petit, plus l'efficacité du réseau est élevée, plus il est facile d'atteindre d'autres nœuds. Cet indicateur est donné comme suit :

$$APL = \frac{1}{N'(N'-1)} \sum_{i \neq j \in g}^N d_{ij}$$

Où d_{ij} est la distance entre V_i et V_j , et g est la composante géante, ce qui signifie que :

i et $j \in g$ $d_{ij} = \text{valeur finie}$

i ou $j \notin g$ $d_{ij} = 0$

Diamètre du réseau

Cet indicateur, noté D , est lié à la distance maximale entre deux nœuds dans la composante géante. Cet indicateur est formulé comme suit :

$$D = \max \{d_{ij}\}$$

Dégradation

Cet indicateur est lié au pourcentage de stations qui ne sont plus en service, qui peut être calculé en utilisant la formule ci-dessous :

$$Deg = (1 - \frac{N''}{N}) \times 100$$

Où N'' représente le nombre de stations qui sont hors service en raison de la ou des perturbations.

Un autre concept utilisé pour illustrer le niveau de dégradation dans un réseau est le seuil de dégradation qui peut être défini comme le nombre de perturbations qui devraient se produire dans le réseau, de sorte que le nombre de stations actives soit égal à une fraction prédéterminée du nombre de stations du réseau d'origine. Par exemple, Deg_{25} est lié au nombre de perturbation(s) au cours desquelles plus d'un quart des stations du réseau sont dégradées ; autrement dit, le nombre de perturbations pour lesquelles la dégradation du réseau dépasse 25 %. De même, Deg_{50} représente le nombre de perturbations selon lesquelles plus de 50% des stations sont hors service, et Deg_{100} de manière similaire, correspond au nombre de perturbations selon lesquelles le réseau est complètement dégradé.

2.3.3.4 Mécanisme de défaillance

Dans cette section, deux questions sont abordées : 1) Les perturbations se produisent dans quel(s) composant(s) du réseau ? 2) Comment sont choisis les composants subissant l'interruption?

Concernant la première question, il existe deux cas généraux : la perturbation peut se produire au niveau des liens (segments ferroviaires) ou dans les nœuds (gares). Dans la stratégie de défaillance basée sur les liens, en cas d'interruption d'un lien, seul ce lien est supprimé du réseau. Dans le cas de la stratégie de défaillance basée sur les nœuds, lorsqu'un nœud est interrompu, ce nœud et tous les liens connectés au nœud sont supprimés. En nous concentrant sur la perturbation des stations, nous avons, dans cette recherche, par la combinaison des deux stratégies mentionnées, introduit une nouvelle stratégie de défaillance intitulée Block-Based Failure Strategy (BBFS) donc interruption basée sur les segments. Dans BBFS, si une perturbation se produit dans un nœud, non seulement le nœud et les liens connectés sont supprimés, mais également le ou les blocs auxquels le nœud appartient sont aussi supprimés. En termes simples, si une perturbation se produit dans une station autre que la première ou la dernière station d'un bloc, seul ce bloc est supprimé. Cependant, si l'une des premières ou des dernières stations -qui est SCDF- est perturbée, tous les blocs connectés à cette SCDF seront supprimés. En effet, pour implémenter le BBFS, le réseau doit être considéré comme un graphe abstrait dans lequel les nœuds correspondent à des SCDF, et les arêtes sont des blocs représentant des stations régulières. Pour clarifier le concept, des exemples du fonctionnement de cette stratégie sont inclus dans la section suivante.

Pour répondre à la deuxième question, il existe également deux cas généraux : les nœuds peuvent être supprimés de manière aléatoire ou sélective. Dans cette recherche, nous n'utilisons que le dernier modèle appelé interruption ciblée par lequel les nœuds peuvent être supprimés par ordre décroissant de degré ou centralité intermédiaire. Cette recherche a appliqué le modèle basé sur l'intermédiarité pour évaluer la vulnérabilité d'un réseau de métro, ce qui signifie qu'à chaque

étape, la distribution de centralité d'intermédiarité du réseau est calculée et, dans le scénario de simulation, le nœud avec la centralité d'intermédiarité la plus élevée est choisi pour être retiré.

2.3.4 Étude de cas

Le métro de Montréal composé de 4 lignes et 68 stations est considéré comme le cas d'étude de la recherche. Comme l'indique la Figure 2-3, les degrés de nœud les plus élevés sont liés aux 4 stations de correspondance du réseau dont la station #18 : BERRI-UQAM ($k_{18}=5$) reliant la ligne jaune, la ligne verte et la ligne orange entre elles, station #11 : LIONEL-GROULX ($k_{11}=4$) reliant la ligne verte à la ligne orange, les stations #24 : JEAN-TALON ($k_{24}=4$) et 7 : SNOWDON ($k_7=3$) reliant la ligne bleue à l'orange. Plus de détails concernant le réseau sont présentés dans le Tableau 2-4.

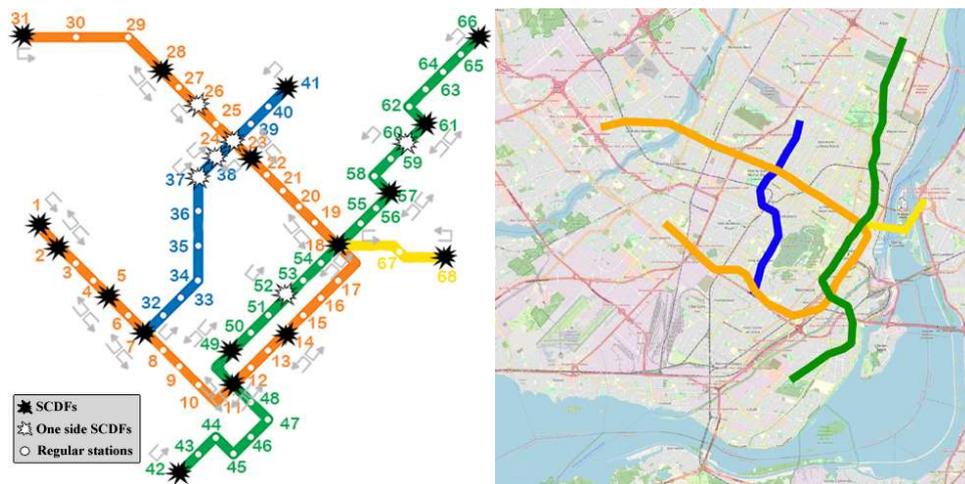


Figure 2-3. Réseau du métro urbain de Montréal

Tableau 2-4 Caractéristiques du RMU de Montréal (État normal)

Informations générales			Indicateurs	
Nombre de nœuds accessibles (stations)			Taille relative du composant géant	
Nombre de hubs accessibles (stations de correspondance)			Longueur moyenne du chemin	
Nb d'arêtes accessibles (segments ferroviaires)			Diamètre	
Attributs de réseau			Dégradation	
			Degré moyen	
Degré maximal	Valeur	5	N° du composant connecté	
	Gare correspondante	Berri-UQAM		
Intermédiarité maximale	Valeur	0.48		
	Gare correspondante	Berri-UQAM		

2.3.4.1 Définition des blocs

Selon les données reçues de l'opérateur du système (STM), il existe 24 SCDF dans le réseau illustré par des étoiles dans la Figure 2-4. Six d'entre elles sont les premières/dernières stations des lignes (stations #1 et 31 de la ligne orange, stations #42 et 66 de la ligne verte, station #41 de la ligne bleue, et station 68 sur la ligne jaune). Dans six d'entre elles (stations n° 23, 26, 37, 38, 52 et 60) marquées d'étoiles blanches, il est possible pour les trains de changer de direction uniquement du côté indiqué par la flèche. Dans 12 SCDF (gares # 2, 4, 7, 11, 14, 18, 28, 43, 49, 57 et 61), les trains peuvent changer de direction des deux côtés si nécessaire. Ainsi, 24 blocs sont définis sur le RMU de Montréal (voir Tableau 2-5).

Tableau 2-5 Détails des blocs du RMU de Montréal

Bloc#	Stations	Bloc#	Stations	Bloc#	Stations
1	1,2	9	24,25,26	17	11,49
2	2,3,4,5	10	26,27,28	18	49,50,51,52
3	5,6,7	11	28,29,30,31	19	52,53,54,18
4	7,8,9,10,11	12	7,32,33,34,35,36,37	20	18,55,56,57
5	11,12,13,14	13	37,38	21	57,58,59,60
6	14,15,16,17,18	14	38,24	22	60,61
7	18,19,20,21,22,23	15	24,39,40,41	23	61,62,63,64,65,66
8	23,24	16	42,43,44,45,46,47,48,11	24	18,67,68

2.3.4.2 Mise en œuvre du BBFS

Sur la base du modèle de suppression basé sur l'intermédiarité, la station avec la valeur d'intermédiarité la plus élevée doit être sélectionnée dans la stratégie de défaillance ciblée. Selon le Tableau 2-5, l'intermédiarité la plus élevée est liée à la station #18 (Berri-UQAM). Par conséquent, cette station doit être sélectionnée pour être supprimée du réseau. Comme Berri-UQAM est une SCDF, selon les règles du BBFS, tous les blocs reliés à cette SCDF seront hors service. Par conséquent, après la première perturbation ciblée, six blocs (# 6, 7, 18, 19, 20 et) comprenant 17 stations seraient hors-service. La Figure 2-4 est destinée à illustrer la configuration du réseau après le premier échec ciblé.

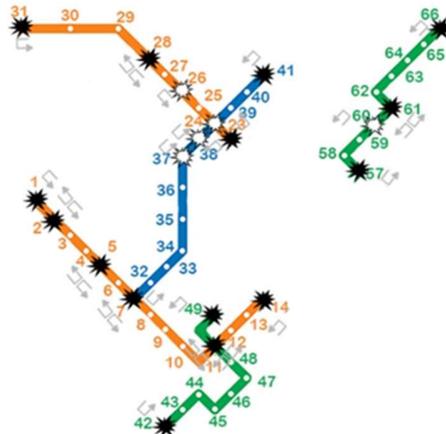


Figure 2-4 Configuration du RMU de Montréal après la première perturbation ciblée

Après chaque perturbation, le réseau doit être analysé et les caractéristiques du réseau doivent être recalculées pour identifier l'élément suivant à supprimer. Plus de détails sur le réseau après la première perturbation ciblée sont présentés dans le Tableau 2-6. L'intermédiarité maximale après la première perturbation, selon le Tableau 2-6, est liée à la station #7 (Snowdon). Ainsi, Snowdon est la prochaine station à supprimer lors de la deuxième étape. Semblable à l'étape 1, Snowdon est un SCDF, et en supprimant cette station, trois blocs (# 3, 4 et 12) seront hors service.

Tableau 2-6 Caractéristiques de l'RMU de Montréal après la première perturbation

Information générale			Indicateurs	
Nombre de nœuds (stations)	51		Taille relative du composant géant	80%
Nombre de nœuds de correspondance	3		Longueur moyenne de trajet	9.358
Nombre de segments	49		Diamètre	26
Attributs du réseau			Dégradation	25%
	Valeur	4	Degré moyen	1.922
Degré maximum	Station (s)	Lionel-Groulx (#11) & Jean-Talon (#24)	Nombre de composants connectés	2
Intermédiarité maximum	Valeur	0.399		
	Station	Snowdon (#7)		

2.3.5 Résultats et discussion

Dans cette section, nous étudions les indicateurs de vulnérabilité topologiques du RMU de Montréal. Tout d'abord, nous utilisons BBFS pour simuler la perturbation et analyser les indicateurs. Ensuite, NBFS est utilisé pour simuler la perturbation. Enfin, nous comparons les résultats de ces simulations pour illustrer l'importance de s'appuyer sur une hypothèse correcte et d'employer une stratégie d'interruption appropriée.

2.3.5.1 Simulation basée sur BBFS

Le mécanisme des simulations basées sur BBFS a été décrit en détail dans les sections précédentes et la première perturbation a été simulée en conséquence. En recommençant la même stratégie de panne, après la neuvième perturbation ciblée, il ne reste plus aucune station active dans le réseau. Le Tableau 2-7 fournit plus d'informations sur l'ordre de sélection des stations et les caractéristiques du réseau après chaque interruption, et la Figure 2-5 montre la configuration du réseau après chaque interruption.

Tableau 2-7 Caractéristiques du RMU de Montréal lors de la dégradation

Numéro d'interruption	Intermédiarité Centralité		Degré		Indicateurs de vulnérabilité topologiques						
	Valeur max	Station correspondante	Valeur max	Station correspondante	RSGC (%)	APL	D	Dégradation	Nombre de composants	Degré moyen	Nombre de stations actives
1	0.399	Snowdon (#7)	4	Lionel-Groulx (#11) & Jean-Talon (#24)	80	9.358	26	25.00%	2	1.922	51
2	0.068	Jean-Talon (#24)	3	Lionel-Groulx (#11)	34	3.877	10	39.71%	4	1.805	41
3	0.071	Lionel-Groulx (#11)	3	Lionel-Groulx (#11)	39	3.622	10	54.41%	4	1.742	31
4	0.131	Viau (#60)	13	13 Stations	52	3.179	9	72.06%	3	1.684	19
5	0.061	De La Savane (#3)	2	7 Stations	38	1.818	4	80.88%	3	1.538	13
6	0.055	Cartier (#29)	4	4 Stations	40	1.615	3	85.29%	3	1.4	10
7	0.2	Préfontaine (#58)	2	Préfontaine (#48) & Joliette (#49)	67	1.33	3	91.18%	2	1.333	6
8	0	-	1	Côte-Vertu (#) & Du Collège (#2)	100	1	1	97.06%	1	1	2
9	-	-	-	-	0	0	0	100.00%	0	0	0

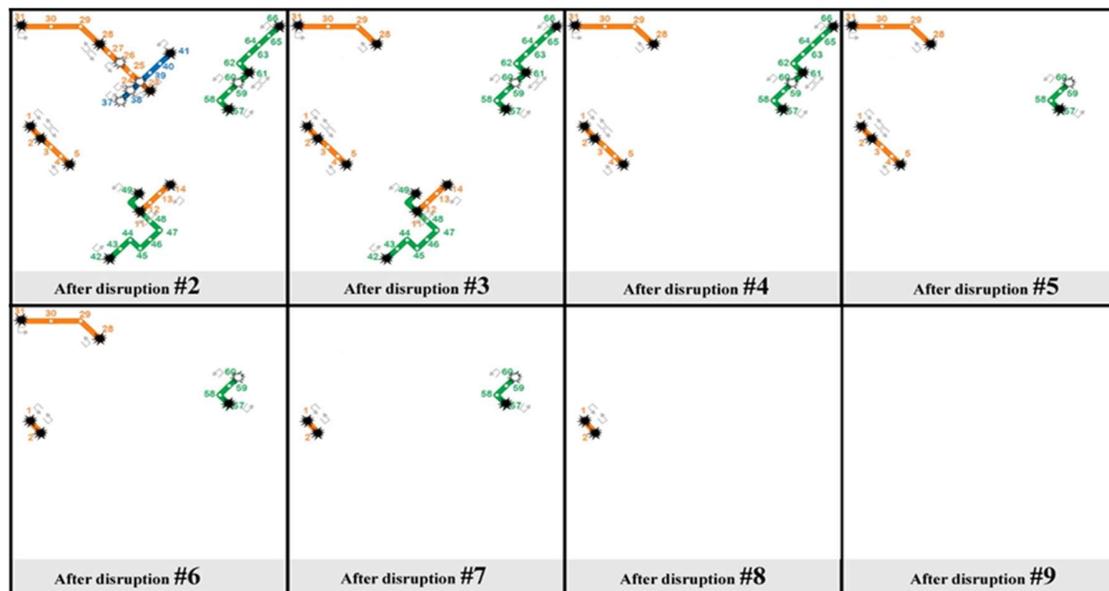


Figure 2-5. Processus de dégradation du RMU de Montréal

Comme l'indique le Tableau 2-7, après chaque perturbation, les indicateurs de vulnérabilité sont recalculés pour démontrer le déclin progressif du réseau et comment le réseau est impacté lors d'un processus de dégradation complet. Les schémas de la Figure 2-5 confirment que dans le schéma de défaillance ciblée, les évolutions significatives des indicateurs sont liées aux premières perturbations. Après la première et la deuxième interruption, le RSGC a diminué à 60 % et 35 % respectivement, ce qui montre qu'après seulement deux interruptions, le réseau perd considérablement de sa stabilité. Le diagramme montre également que les six dernières perturbations n'apportent pas de changements significatifs au RSGC. Considérant le diagramme

du diamètre du réseau (ND), après la première perturbation (lorsque $Deg = 25\%$), ND a diminué de 29 à 26 (environ 10 %), et après la deuxième perturbation (lorsque $Deg = 40\%$), ND a diminué de 26 à 10 (plus de 60%). Ainsi, après deux perturbations ciblées, la durée des trajets a considérablement diminué, et le réseau perd en couverture. Semblable au RSGC, le diagramme ND montre également que les dernières perturbations ne créent pas de changements importants.

2.3.5.2 Simulation basée sur NBFS

Basé sur NBFS, lorsqu'un nœud est interrompu, le nœud et les liens connectés au nœud sont supprimés. Ainsi, en adoptant le NBFS, après 35 perturbations ciblées basées sur l'ordre décroissant de centralité intermédiaire, toutes les stations seraient hors service. Selon la Figure 2-6, après la 5e perturbation, le RSGC, le diamètre du réseau et la longueur moyenne du trajet ont diminué respectivement de 89 %, 80 % et 69 %, ce qui renforce l'hypothèse selon laquelle, dans les perturbations ciblées, les changements significatifs sont principalement observés lors des premières perturbations.

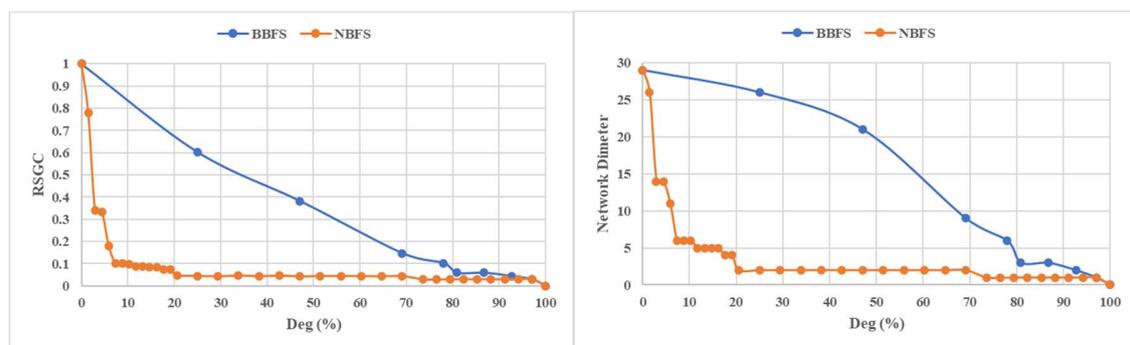


Figure 2-6. Comparaison des indicateurs d'évaluation de la vulnérabilité des implémentations BBFS et NBFS

2.3.5.3 Comparaison des simulations basées sur BBFS et NBFS

En ce qui concerne la comparaison de ces deux stratégies de simulation, la distinction la plus importante est liée au nombre de stations qui, à chaque perturbation, seront hors service, ou en d'autres termes, le nombre de perturbations entraînant une dégradation complète du réseau. Comme l'indique la figure ci-dessous, lorsque le BBFS est mis en œuvre, $Deg_{25\%} = 1$, $Deg_{50\%} = 3$ et $Deg_{100\%} = 9$, ce qui signifie qu'au moins 25 % des stations lors de la première interruption, au moins 50 % des stations lors de la troisième interruption et qu'à la neuvième interruption toutes les stations sont interrompues. Tandis que par la mise en œuvre de NBFS, $Deg_{25\%} = 15$, $Deg_{50\%} = 21$, and $Deg_{100\%} = 35$, c'est-à-dire qu'en adoptant cette stratégie après la quinzième perturbation, 25% des stations sont hors service et le réseau peut tolérer 35 perturbations avant d'être complètement dégradé.

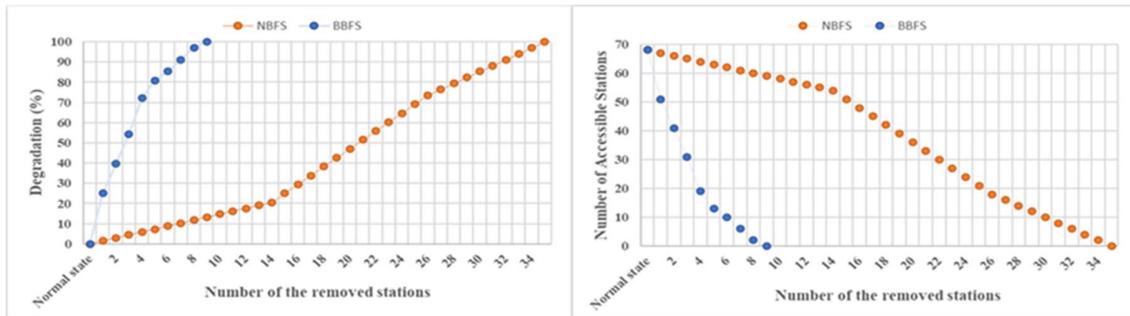


Figure 2-7 Processus de dégradation basé sur BBFS et NBFS

Étant donné que le nombre de stations supprimées dans la simulation de dégradation complète du réseau de ces deux stratégies est significativement différent, la part de stations supprimées (pourcentage de dégradation) est utilisée pour différencier entre BBFS et NBFS. Comme l'indique la Figure 2-7, dans la mise en œuvre du BBFS, le RSGC a diminué à 80 % lorsque 25 % des stations sont dégradées, tandis qu'environ le même pourcentage a diminué dans le NBFS lorsque seulement 1,5 % des stations sont dégradées. De même, le RSGC a diminué de 65 % dans la mise en œuvre du BBFS lorsque 40 % des stations sont hors service, alors que dans la mise en œuvre du NBFS, le RSGC a atteint le même pourcentage une fois que seulement 3 % des stations sont hors service. Il existe une tendance similaire pour d'autres indicateurs où la longueur moyenne du trajet a diminué de 72 % dans la mise en œuvre du BBFS lorsque 71 % des stations sont dégradées, tandis que dans la mise en œuvre du NBSF, la longueur moyenne du trajet atteint ce pourcentage une fois que seulement 6 % des stations sont dégradées. Les changements de diamètre du réseau suivent un schéma similaire, diminuant de 10 % dans la simulation BBFS lorsque 25 % des stations sont hors service, tandis que dans NBFS, ils atteignent ce pourcentage après la première interruption (dégradation de 1,5 %). Cependant, la différence la plus considérable est liée au nombre de composants connectés après chaque perturbation, où en adoptant BBFS, le réseau est divisé au maximum en 4 composants connectés, tandis que les résultats de la simulation NBFS montrent qu'après la seizième perturbation, le réseau est divisé en 21 composants connectés.

2.3.6 Conclusion et travaux

Cette recherche a proposé une nouvelle stratégie de défaillance dans le domaine de l'évaluation de la vulnérabilité des réseaux de métro. Cette stratégie de défaillance appelée stratégie de défaillance basée sur les blocs (BBFS) est proposée en raison de l'inefficacité des stratégies précédentes - telles que la stratégie de défaillance basée sur les nœuds (NBFS) - en tenant compte de la durée de la perturbation et des caractéristiques infrastructurelles du réseau de métro. Les anciennes stratégies ne peuvent pas considérer la situation du réseau si les perturbations se prolongent, se concentrant sur les configurations du réseau uniquement au moment précis de la perturbation. Par conséquent, l'utilisation de telles méthodes pour simuler une perturbation dans le monde réel n'est pas appropriée. Cette recherche illustre comment le fait de ne pas prêter attention aux caractéristiques infrastructurelles d'un réseau de métro telles que les stations avec des installations de changement de direction (SDCF) et d'utiliser les anciennes stratégies de défaillance (telles que NBFS) au lieu de BBFS, rend les résultats inutilisables dans un contexte réel. Pour cela, le réseau du métro de Montréal a été pris comme cas d'étude et sa vulnérabilité topologique aux perturbations ciblées a été investiguée. Dans cette recherche, le NBFS et le BBFS ont été mis en œuvre séparément et les résultats ont été comparés. Sur la base des analyses, il existe des différences significatives dans les résultats des simulations. Par exemple, lorsque le

BBFS est mis en œuvre, le $Deg_{100} = 9$, tandis que dans la simulation menée sur la base du NBFS, le $Deg_{100} = 35$, ce qui signifie que si les SDCF sont identifiés et que cette question est prise en compte dans la recherche, après 9 perturbations ciblées, tout le réseau serait dégradé. Alors que si ces stations ne sont pas identifiées et sur la base d'une hypothèse simplificatrice erronée toutes les stations sont considérées comme des SDCF, le réseau peut tolérer 35 perturbations ciblées ce qui est significativement loin de la robustesse réelle du réseau.

Compte tenu du rôle important joué par les SDCF, l'une des contributions de cette recherche est de donner une idée des impacts de la localisation des SDCF sur la robustesse du réseau. Bien que le processus de conception du réseau soit un processus sophistiqué dans lequel un large éventail de contraintes techniques et financières sont prises en compte, notre suggestion la plus simple est de localiser les SDCF aussi près que possible des points de correspondance du réseau. Des méthodes d'optimisation peuvent être utilisées pour identifier les meilleurs emplacements des SDCF dans un réseau de métro.

D'autres études sur l'investigation de la vulnérabilité peuvent être envisagées avec plus d'indicateurs, se concentrant sur les caractéristiques fonctionnelles (liées au transport) du réseau. De plus, en ajoutant des lignes ferroviaires régionales au réseau actuel, la vulnérabilité du réseau de transport ferroviaire urbain de Montréal pourrait être évaluée de manière exhaustive. La prise en compte des interruptions aléatoires ainsi que la présentation d'une stratégie de suppression aléatoire pondérée sont d'autres perspectives de cette recherche.

2.4 Typologie de segments pour soutenir le développement de cycles de conduite

- Par : Asad Yarahmadi, doctorat
- Supervision : Pre Catherine Morency et Pr Martin Trépanier
- Contexte : Chaire en transformation du transport
- Fin prévue : décembre 2023

2.4.1 Introduction

Un segment de route peut être caractérisé par diverses caractéristiques telles que la pente, la courbure, le nombre de voies, etc. De nombreuses études montrent que ces caractéristiques ont des effets très variés sur la vitesse de conduite et les émissions des véhicules. Brundell-Freij & Ericsson, (2005) montrent qu'en augmentant la densité des intersections signalisées, la vitesse de circulation diminue de 41 % et les émissions des véhicules augmentent. Cependant, cette étude ne propose pas d'évaluation de l'ampleur de cette augmentation. Svenson & Fjeld, (2016) explorent les relations entre la géométrie de la route et la consommation de carburant et concluent que l'ondulation, la courbure et la rugosité de la surface sont responsables d'une augmentation de 107 % de la consommation de carburant. Goralzik & Vollrath, (2017) révèlent que le choix de vitesse des conducteurs sur la route avec une limite de vitesse de 50 km/h peut être fortement affecté par la largeur de la route. De très mauvaises conditions routières réduisent la vitesse des véhicules de 55 % par rapport aux meilleures conditions de conduite (Varella et al., 2018). En conséquence, les émissions des véhicules augmentent de 2,49 %. Nouri (2015) démontre qu'un changement de la pente de la route de près de 10 %, en moyenne, augmente la consommation de carburant de 5 %, bien qu'ils soient liés de manière non linéaire. Par conséquent, les caractéristiques de la route influencent la vitesse de conduite et les émissions des véhicules. Carlson et al., (2013), à travers le projet MIRAVEC (Modeling Infrastructure Influence on Road Vehicle Energy Consumption), montrent que la consommation de carburant des véhicules est fonction de la largeur de la route, de la limite de vitesse, de la courbure et de la pente.

Des études antérieures ont proposé des typologies de segments de route en fonction de leurs fonctions, qui sont liées au type de service qu'un segment de route fournit. Cependant, cette approche se limite à répondre à des questions telles que celle de savoir si tous les segments de route ayant la même fonction ont des effets similaires sur la vitesse de conduite et les émissions des véhicules. En outre, les travaux de recherche qui analysent la relation entre les facteurs routiers et la vitesse de conduite se sont principalement concentrés sur quelques liaisons routières avec une certaine fonction routière. Par exemple, Abele & Møller, (2011) ont exploré l'influence de la conception des routes sur la vitesse de conduite et se sont uniquement concentrés sur une route rurale de 5 km. Nama et al., (2016) ont étudié la vitesse de conduite sur des segments de route avec à la fois des pentes et des courbes. Une telle approche ne permet pas de savoir si des résultats équivalents seraient obtenus pour des segments présentant d'autres fonctions de la route ou si les effets des caractéristiques de la route restent constants lorsque d'autres combinaisons sont testées. Par exemple, l'effet de la pente change-t-il avec un rayon de courbure différent ?

Cette étude est menée pour combler les lacunes identifiées. L'objectif principal de cette étude est de proposer une typologie permettant de mieux décrire les associations entre les segments de route et les habitudes de conduite reflétées par la vitesse de conduite. À cette fin, des techniques d'apprentissage automatique sont utilisées pour classer les segments de route en différents types de routes en fonction des facteurs affectant les habitudes de conduite. On s'attend à ce que des

segments d'un même type de route aient une influence similaire sur la vitesse de conduite. Ceci sera exploré plus en détail dans les prochaines étapes de cette recherche visant à proposer des ensembles optimaux de cycles de conduite pour représenter les comportements de conduite d'une région. Les liens du réseau routier de la région de Montréal, utilisé comme étude de cas dans cette recherche, sont catégorisés. Par conséquent, cette recherche vise également à analyser l'influence des changements dans les combinaisons des caractéristiques de la route sur la vitesse de conduite.

Les questions de recherche de cette étude sont les suivantes :

- Combien de types de routes sont nécessaires pour décrire correctement un réseau routier urbain ?
- Quelle est la meilleure approche pour identifier les types de routes ? Comment valider le résultat de la classification ?
- Les effets des caractéristiques de la rue sur la vitesse de conduite varient-ils selon les types de routes ?
- Quels facteurs dans chaque type de route ont l'influence la plus significative sur la vitesse de conduite ?

L'élaboration de la typologie du réseau routier permet de déterminer le nombre de types de routes ayant des influences différentes sur la vitesse de circulation dans une zone urbaine. Cette typologie est l'étape la plus cruciale dans la désignation d'ensembles optimaux de cycles de conduite qui constitue la prochaine étape de cette étude. Le cycle de conduite, représentant le comportement de conduite moyen, est l'un des paramètres d'entrée les plus importants dans les modèles d'émissions de véhicules comme le modèle MOVES.

2.4.2 Revue de la Littérature

Cette section est composée de deux parties. Dans la première partie, les approches développées pour étudier les associations entre le type de route et la vitesse de conduite sont passées en revue, et leurs avantages et inconvénients sont explorés. La deuxième partie examine de manière critique les recherches menées pour générer une typologie de segments routiers. Ces deux volets nous permettent d'identifier les lacunes de recherche pertinentes.

2.4.2.1 Facteurs influant sur les habitudes de conduite

Un réseau routier urbain est complexe car il comprend de nombreux tronçons qui peuvent présenter des caractéristiques diverses. Parmi ces caractéristiques, la fonction de la route (Ferreira et al., 2019), la densité d'intersections signalisées (Ericsson et al., 2006), l'accessibilité (Aronsson, 2006) et l'utilisation du sol dans le voisinage ont une influence notable sur la vitesse de conduite et les émissions des véhicules. Explorer les effets de ces caractéristiques sur la vitesse de conduite est un défi. Tout d'abord, chaque caractéristique peut avoir une large gamme de valeurs et ses impacts peuvent changer en fonction de ces valeurs. Par exemple, (Chen & Cheng, 2010) ont utilisé un test t pour vérifier l'impact de la pente sur la vitesse de conduite sur 90 segments d'autoroute. Ils démontrent que les valeurs de vitesse chutent d'environ 110 km/h à 80 km/h environ la pente change de -4% à 4%. Cependant, aucun détail sur les attributs des segments et la résolution spatiale du modèle numérique d'élévation (DEM) n'a été présenté dans l'article. De plus, l'effet combiné de plusieurs caractéristiques pourrait modifier l'influence d'un facteur. Par exemple, (Nama et al., 2016) ont analysé l'effet combiné de la pente et de la courbe sur la vitesse de conduite sur les routes de montagne en Inde. Ils ont montré que l'influence de la courbe sur la vitesse de conduite augmente lorsque la pente diminue. Cependant, leur étude a une valeur

limitée en raison du petit échantillon utilisé, notamment en ce qui concerne la longueur des courbes, qui sont réparties de 10 m à 250 m au plus et sont trop courtes pour étudier les changements de vitesse.

L'approche principale pour surmonter cette complication était de se concentrer sur une fonction routière particulière et un nombre limité de facteurs routiers. (Abele & Møller, 2011) ont simulé 5 km de routes rurales pour sonder l'association entre la présence d'arbres en bordure de route, l'accotement de la route, l'alignement horizontal et la vitesse de conduite. Les auteurs ont conclu que l'accotement de la route et les arbres le long de l'allée n'affectaient pas la vitesse de conduite. Cependant, en raison de la petite taille de l'échantillon, ils ont recommandé de considérer leurs conclusions comme des résultats provisoires. Liu et al., (2016) ont exploré les influences de la largeur des voies, de la position des voies et de la largeur des accotements sur la vitesse de conduite pour une autoroute urbaine souterraine à trois voies. Selon une analyse statistique, ils ont conclu que la largeur de la voie a une influence plus importante que les deux autres facteurs: les conducteurs roulent en moyenne 20 km/h plus vite en grande largeur.

Bien que tenant compte de quelques facteurs routiers, cette approche simplifie la complexité des situations réelle et peut fournir des connaissances sur l'interaction entre la vitesse de conduite et les caractéristiques de la route ; cela pourrait aussi être une source de résultats contradictoires. Par exemple, Silvano & Bang (2016) ont montré que l'environnement routier pouvait avoir un impact important sur la vitesse de conduite, mais les résultats de Andersen & Reinau (2016) montrent que l'aménagement du territoire ne peut pas affecter la vitesse de conduite. Babić et al. (2020) ont indiqué que l'accotement n'affecte pas la vitesse de conduite, tandis que Ben-Bassat & Shinar (2011) ont plutôt démontré que les accotements pouvaient avoir des effets considérables sur la vitesse de conduite. En effet, de nombreux exemples de résultats contradictoires existent dans la littérature. Il convient de noter qu'une autre source de contradiction pourrait être liée à la méthode de simulation utilisée pour étudier la relation entre les caractéristiques de la route et la vitesse de conduite. La simulation de conduite est une méthode informatisée pour examiner la vitesse de conduite dans un environnement contrôlé. Les inconvénients de l'approche basée sur la simulation sont que les outils de simulation ne peuvent principalement pas prendre en compte de nombreux détails vitaux du monde réel, tels que les conditions de circulation, dans leur calcul. Cela peut entraîner une incertitude dans les résultats obtenus. De plus, la précision, la validité et la crédibilité de la simulation dépendent fortement des paramètres du simulateur, tels que le champ de vision (FOV)(Durkee, 2010). Le champ de vision (FOV) est la zone maximale qu'un simulateur peut présenter à un utilisateur.

2.4.2.2 Méthodologie de classification des routes

La catégorisation des types de routes en fonction de leurs effets sur la vitesse de conduite n'a pas encore été effectuée. Les études antérieures qui catégorisaient les tronçons routiers peuvent être regroupées en deux groupes : les recherches qui catégorisent les tronçons routiers selon leurs fonctions, appelées classification fonctionnelle. Il convient de mentionner que la classification fonctionnelle détermine le rôle que joue un lien routier dans la desserte du flux de circulation dans le réseau routier (FHWA, 2013). Les fonctions routières diffèrent d'un pays à l'autre, mais les fonctions standard sont les autoroutes, les collecteurs, les sections locales et externes (FHWA, 2013). Le deuxième groupe d'études développe un algorithme pour identifier les segments en fonction de leurs revêtements routiers, tels que l'asphalte et le béton.

Presque toutes les études antérieures ont généré une typologie de segments routiers selon le concept de classification fonctionnelle. Pour réaliser cette typologie, les principaux critères sont les caractéristiques du débit de circulation, telles que le débit et l'efficacité des véhicules

motorisés (Kliment Ohridski" -Bitola, 2009), et les aspects environnementaux du transport (c'est-à-dire les émissions des véhicules) sont négligés. Le conseil municipal a élaboré le système de classification des routes de la ville de Toronto (Stevanovic-Briatico, 2013). Dans ce système, treize critères sont inclus : « Circulation versus accès à la propriété », « Volume de circulation automobile quotidien typique », « Nombre minimum de voies en période de pointe », « Liaisons souhaitables », « Caractéristiques des flux », « Limite de vitesse légale », « Infrastructures pour piétons », « Infrastructures pour cyclistes », « Transport en commun de surface », « Passagers quotidiens du transport en commun de surface », « Passagers de camions lourds », « Espacement typique entre les dispositifs de signalisation » et « Largeur typique de l'emprise. » Par conséquent, les segments de la route de Toronto sont classés en quatre types : autoroutes, artères principales, artères secondaires, routes collectrices et routes locales. Vitkienė et al., (2017) ont examiné les systèmes de classification des routes et les hiérarchies routières de dix pays, dont les États-Unis, l'Allemagne, l'Autriche, la Pologne, le Danemark, la Grèce, la Norvège, le Portugal et la Lituanie. Les auteurs ont conclu qu'il n'existe pas de système normé de classification des routes. Au lieu de cela, les liens, les rôles et les fonctions de la route sont les critères les plus couramment utilisés parmi les critères pris en compte pour classer le type de route.

Le deuxième groupe d'études est plus axé sur le développement de techniques de science des données pour identifier les réseaux routiers et les classer selon les types de revêtements routiers. La plupart se concentrent sur le développement d'approches pour extraire des informations à partir d'images, de données vectorielles et de données de téléphonie mobile (Gonzalez et al., 2017). Saleh & Otoum, (2020) ont classé le type de route selon les images recueillies à partir de Google Street View et Google Image. Cependant, ils n'incluaient pas les caractéristiques essentielles telles que la géométrie et la conception des routes, et leur méthode identifiait les routes uniquement en fonction du type de surface (sable, asphalte, béton). Outay et al. (2021) ont profité d'indicateurs topologiques pour classer les liens du réseau routier. Pour mesurer la similitude entre les réseaux de rues, ils ont d'abord utilisé des principes topologiques pour définir une structure de réseau arborescente avec des variables de connectivité, de hiérarchie et d'accessibilité. Ensuite, ces variables ont été utilisées pour mesurer la similarité entre les liens. Enfin, le modèle développé a été estimé sur différents axes routiers urbains. La principale limite de ce projet est liée aux facteurs pris en compte dans la classification. Les auteurs ont considéré uniquement les formes géométriques pour classer les types de route sans inclure d'autres éléments essentiels tels que la limite de vitesse, la pente, etc. Gonzalez et al. (2017) ont proposé une nouvelle technique développée à partir de la représentation Bag of Words (BoW) et ont utilisé des données d'accéléromètre pour classer les modèles de perturbation de la surface de la chaussée (RSD). RSD est un obstacle permanent (c'est-à-dire des nids-de-poule et des dos d'âne). Les auteurs ont prouvé que la combinaison de BoW et de réseaux de neurones artificiels offrait un excellent potentiel pour capturer les modèles RSD à partir des données de l'accéléromètre et générer des classes RSD de haute précision. Cependant, l'algorithme développé a une grande complexité de calcul et doit être exécuté dans un environnement infonuagique.

En conclusion, il convient de noter que les variables du réseau routier influençant la vitesse et les émissions des véhicules n'ont pas été prises en compte dans les classifications examinées. De plus, la plupart des méthodologies développées pour catégoriser les types de routes ne comprenaient que des caractéristiques limitées, telles que les fonctions de la route et les types de revêtements routiers. Ils n'ont pas étudié l'influence de diverses caractéristiques. Par conséquent, les résultats ont une pertinence limitée pour l'analyse des habitudes de déplacement. Les facteurs critiques affectant la vitesse de conduite doivent être pris en compte pour obtenir des résultats pertinents pour soutenir la recherche sur les habitudes de conduite.

2.4.3 Modèle conceptuel de la méthodologie de recherche et de la structure des données

Tel que présenté à la Figure 2-8, cette étude comprend trois phases distinctes. Dans la première phase, toutes les données requises sont rassemblées, puis des techniques d'ingénierie des fonctionnalités sont utilisées pour les préparer à l'analyse. Dans la dernière étape de la première phase, un modèle de régression, nommé base, est généré pour étudier la relation entre les caractéristiques de la route et la vitesse de conduite. Ensuite, dans la deuxième phase, tous les segments de route sont classés en utilisant trois approches de classification. Ensuite, diverses techniques de validation valident les résultats. Enfin, un modèle de régression est utilisé pour analyser la sensibilité et pour étudier comment les types de route générés décrivent les changements de vitesse de conduite.

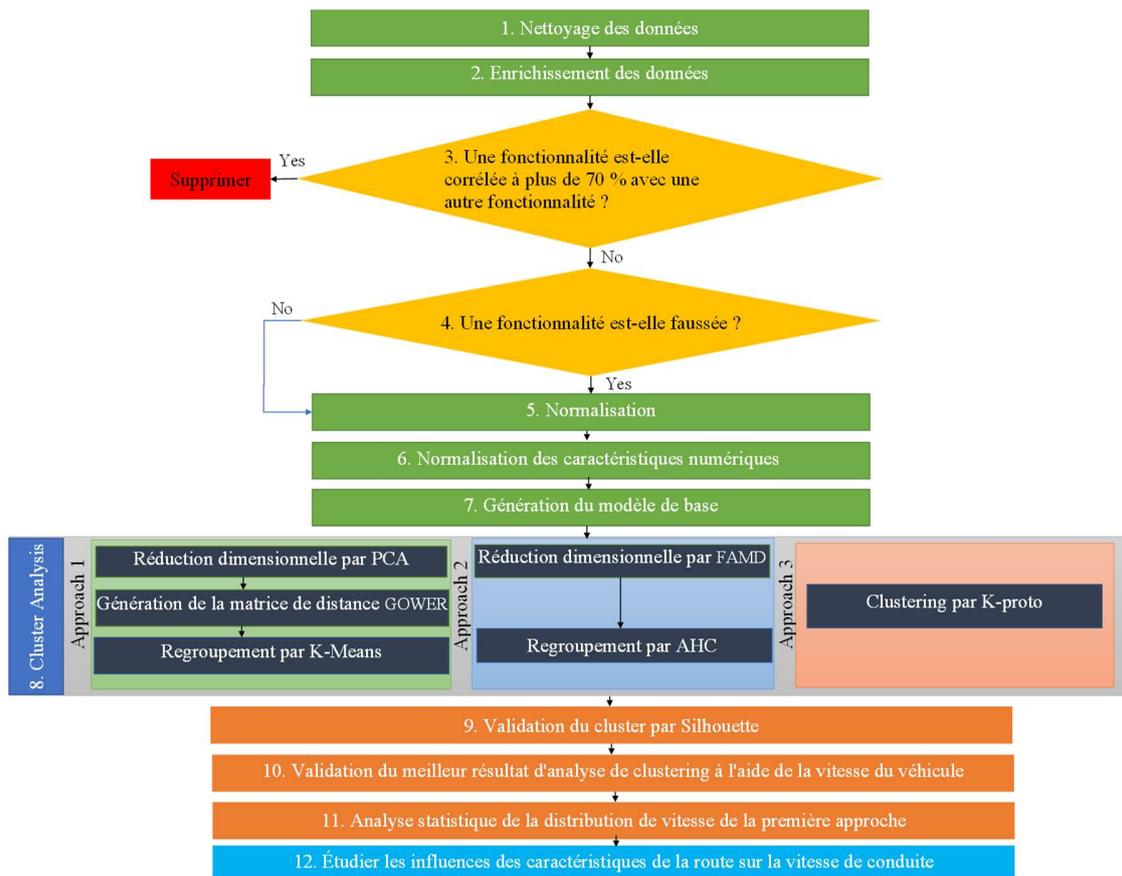


Figure 2-8. Modèle conceptuel de la méthodologie de recherche

Contrairement aux études antérieures qui portaient principalement sur une fonction routière particulière et un nombre limité de caractéristiques, cette recherche utilise tous les liens routiers du réseau de l'île de Montréal. Les fonctions routières à Montréal sont Autoroute, Artère principale, Artère secondaire, Rampe, Tertiaire et Local. Toutes les fonctions de la route et leurs caractéristiques variées sont incluses dans cette recherche, à l'exception des tronçons à fonction locale. La fonction locale compose environ 64 % des segments du réseau de l'île de Montréal.

Selon la littérature, les caractéristiques de la rue répertoriées dans le Tableau 2-8 affectent de manière significative la vitesse de conduite et les émissions des véhicules. Les données du chemin

de Montréal ont été téléchargées à partir d'Open Street Map (OSM), avec environ 9 409 segments pour une longueur totale d'environ 131 km.

Les données de vitesse sont collectées dans les conditions de conduite réelles, y compris les heures de pointe et les heures creuses, à l'aide du GPS intégré dans les taxis lorsqu'ils étaient occupés d'avril 2020 à décembre 2020. Des détails descriptifs sur les données sont présentés dans le Tableau 2-8.

Tableau 2-8. Description des données utilisées dans l'étude

Variables		Analyse descriptive	Application
Fonctions routières	Autoroute	Longueur: 25.675 (km)	Élaboration de la typologie des tronçons routiers
		Part des segments : 23%	
	Artères primaires	Longueur: 14.921 (km)	
		Part des segments: 9%	
	Artères secondaires	Longueur: 61.436 (km)	
		Part des segments: 41.52%	
	Rampe	Longueur: 5.238 (km)	
		Part des segments: 7%	
Tertiaire	Longueur: 24.519		
	Part des segments:18%		
Limitation de vitesse		30 (km/h)	Élaboration de la typologie des tronçons routiers
		Part des segments: 3%	
		40 (km/h)	
		Part des segments: 11%	
		50 (km/h)	
		Part des segments: 60%	
		60 (km/h)	
		Part des segments: 4%	
		70 (km/h)	
		Part des segments: 10%	
		100 (km/h)	
Part des segments: 12%			
Nombre de voies		Min: 1	Élaboration de la typologie des tronçons routiers
		Max: 7	
Alignement vertical		Min: -8%	Élaboration de la typologie des tronçons routiers
		Max: +8%	
		STD: 1.2	

		Moy: 0	
La densité des intersections signalisées (km ²)		Min: 0	Élaboration de la typologie des tronçons routiers
		Max: 15	
		STD: 2.8	
		Moy: 2.5	
Alignement horizontal		Min: 94 (m)	Élaboration de la typologie des tronçons routiers
		Max: 3.927 (m)	
		STD: 517	
		Moy: 546	
L'utilisation des terres:	Résidentielle	Part des données (surface): 44%	Élaboration de la typologie des tronçons routiers
	Centre-ville	Part des données (surface): 9%	
	Industrie	Part des données (surface): 23%	
	Zone de conservation	Part des données (surface): 1%	
	Grande infrastructure publique	Part des données (surface): 0.6%	
	Activités mixtes	Part des données (surface): 18%	
	Park	Part des données (surface): 2%	
Accessibilité		Min: 0.007	Élaboration de la typologie des tronçons routiers
		Max: 0.64	
		STD: 0.14	
		Moy: 0.15	
Vitesse du véhicule		Min: 1 (km/h)	Validation des grappes et relation entre les caractéristiques de la route et la vitesse du véhicule.
		Max: 97 (km/h)	
		STD: 16.64 (km/h)	
		Moy: 31.28 (km/h)	

2.4.4 Générer une typologie de route

La méthode des k-moyennes et la distance Gower sont utilisés pour générer la typologie des segments routiers. La technique de Gower génère une matrice de similarité dans laquelle un seul tableau affiche la similarité entre deux segments. Le nombre de segments est de 9 409, donc une matrice de 9 409 par 9 409 est générée. La similarité globale moyenne entre les segments est de 0,23 et la similarité maximale est de 0,66.

Après avoir généré la matrice, l'étape suivante consiste à déployer la technique de classification par k-moyennes. Comme indiqué précédemment, le nombre de groupes doit être pré-spécifié. Pour ce faire, la méthode du coude est utilisée.

Les k-moyennes sont effectuées et cinq types de route sont générés. Les attributs essentiels des groupes sont les suivants :

- Le groupe 1, représentant le type de route 1, contient le moins de segments par rapport aux autres groupes avec 965 segments. En ce qui concerne la fonction routière, environ 67 % des segments sont des autoroutes avec des limites de vitesse de 60 km/h, 70 km/h et 100 km/h. De plus, ces segments sont dans une zone plane avec une pente de 0% à 1%. La plupart des segments ont une densité d'intersection signalisée de zéro.
- Le type de route 2 contient principalement le type de route secondaire. Tous les segments sont entourés de terres résidentielles et ont des limites de vitesse entre 30 km/h et 60 km/h.
- Le type de route 3 représente les liaisons routières dans le centre-ville ; beaucoup ont des limites de vitesse de 30 km/h à 40 km/h et la plus forte densité d'intersections signalisées.
- Le type de route 4 est le seul groupe qui contient toutes les fonctions de la route, et tous ses liens sont répartis dans des zones industrielles avec des pentes de -1% à 1%.
- Le nombre de segments dans le type de route 5 est le même que dans le type de route 4, soit 1 519 et 1 599, respectivement. Cependant, contrairement aux autres groupes, qui ont une ou deux utilisations du sol, toutes sortes d'utilisations du sol peuvent être trouvées dans le type de route 5. Concernant les autres attributs, les valeurs de pente sont de -2% à 2%, et les limites de vitesse minimale et maximale se situent entre 40 km/h et 70 km/h.

Les résultats du regroupement doivent être validés pour mesurer la précision avec laquelle les segments sont regroupés. Les indices conventionnels dont la littérature confirme qu'ils sont plus fiables avec la méthode de la silhouette. Cette recherche utilise cet indice pour déterminer le nombre optimal de types de routes. Pour valider la précision des clusters, la vitesse du véhicule est utilisée. La valeur de la silhouette varie de -1 à 1, -1 étant la pire et 1 la meilleure. La valeur de la silhouette pour cette typologie (approche 1) est de 0,571.

La *Figure 2-9* montre la répartition des types de routes sur le réseau routier montréalais.



Figure 2-9. Typologie du réseau de l'île de Montréal selon l'approche 1

2.4.5 Conclusion

Tout d'abord, les études antérieures classaient les segments de route principalement en fonction de leurs fonctions, tandis que la littérature montre que la vitesse de conduite et les émissions des véhicules sont influencées par diverses caractéristiques de la route. Par conséquent, cette étude a développé un cadre basé sur les données utilisant l'apprentissage automatique pour identifier et catégoriser les segments de route en fonction des caractéristiques les plus critiques affectant la vitesse de conduite. Des techniques de regroupement ont été appliquées sur les segments du réseau routier de Montréal à titre d'étude de cas, et les techniques de validation des classifications montrent que la combinaison des k-moyennes et de la mesure de similarité de Gower produit les résultats les plus précis, ce qui permet de regrouper les segments en cinq types de routes.

Le principal avantage de l'approche proposée est sa flexibilité en termes d'échelle de la zone d'étude ; il peut être utilisé pour classer les segments de route de la ville quelle que soit la taille du réseau routier. De plus, le cadre développé bénéficie des techniques d'apprentissage automatique conventionnelles pour générer des typologies de routes à l'aide de diverses caractéristiques de rue ; par conséquent, ce cadre pourrait être une référence pour classer les segments de route dans d'autres villes.

Cependant, le principal défi de cette étape est la rareté et la qualité des données. En raison de l'ampleur de la ville et du nombre de segments, l'étape de prétraitement a pris beaucoup de temps.

La deuxième lacune est liée à la validation des résultats de classification. La littérature a révélé que le type de données pouvait affecter la validité des techniques de classification conventionnelles telles que Silhouette. Par conséquent, une étape de validation supplémentaire a été développée pour les données de vitesse des véhicules afin d'augmenter la fiabilité des résultats. L'appariement des segments de route a généré cinq groupes de données de vitesse dans chaque type de route.

La dernière contribution de cette étude concerne le développement de modèles pour expliquer la relation entre les caractéristiques de la route et la vitesse de conduite. Le développement du modèle de base a démontré que l'utilisation de réseaux routiers entiers ne peut pas très bien expliquer les changements de vitesse de fonctionnement.

Les résultats de cette étude ont démontré que la combinaison des caractéristiques de la route devrait être considérée comme un facteur important dans la détermination des facteurs les plus critiques. De plus, contrairement aux études précédentes présentant certaines caractéristiques spécifiques comme les facteurs les plus influents, ce qui est la principale source de résultats contradictoires existants dans la littérature, la présente recherche a confirmé que les principales caractéristiques d'influence diffèrent d'un type de route à l'autre.

En conclusion, cette étude montre que le cadre développé peut identifier différents types de route en fonction de leurs caractéristiques routières et suggère que, comme les vitesses de conduite dans les types de route sont différentes, le cycle de conduite dans chaque type de route pourrait également être différent.

2.5 Fiabilité des services de transport en commun

- Par : Yuxuan Wang, doctorat
- Supervision : Pre Catherine Morency et Pr Martin Trépanier
- Contexte : CRSNG subventions à la découverte
- Fin prévue : décembre 2024

2.5.1 Introduction

De nombreuses sociétés de transport ont essayé d'améliorer la fiabilité de leurs services, parce qu'elle est importante pour les opérations et pour l'expérience de déplacement des passagers. Du point de vue des sociétés de transport, la fiabilité des services affecte la programmation des heures de travail des chauffeurs et des véhicules. Les planificateurs doivent souvent ajouter du temps de parcours additionnel ou des temps d'attente pour tenir compte des variations de fiabilité. Ces temps additionnels vont augmenter les coûts d'exploitation pour les sociétés de transport. Les retards pourraient accroître l'insatisfaction des chauffeurs et pourraient se propager aux prochains départs (Danaher et al., 2020).

Du point de vue des usagers, la fiabilité affecte leur satisfaction et leur choix du mode de transport; les services peu fiables sont moins attrayants (Carrel et al., 2013). Certaines enquêtes ont montré que les passagers accordent plus d'importance à la fiabilité des services qu'à leur fréquence et à la durée des trajets (Balcombe et al., 2004; Daskalakis et Stathopoulos, 2008; Chen et al., 2003; Perk et al., 2008).

De nombreux travaux s'intéressent à la variabilité des temps de parcours dans les transports en commun. C'est important pour de nombreux aspects de la planification et de l'exploitation des services, tels que la programmation des horaires (Trépanier et al., 2009), la prédiction de l'heure d'arrivée des véhicules (Chen et al., 2022), la coordination des correspondances (Bhaskar et al., 2017) et l'évaluation de l'expérience des passagers (Ma et al., 2014). Plusieurs projets précédents ont observé que la distribution statistique des temps de parcours dans les transports en commun pouvait être modélisée par un mélange de gaussiennes (Kieu et al., 2015 ; Ma et al., 2014 ; Wang, 2020). Un mélange de gaussiennes peut être considérée comme plusieurs conditions de parcours différentes se produisant avec des probabilités différentes. En d'autres termes, nous sélectionnons d'abord une condition de déplacement parmi un ensemble de conditions de voyage avec différentes probabilités, puis nous observons la valeur du temps de voyage selon la condition de voyage sélectionnée.

Un temps de parcours représenté par un mélange de gaussiennes rend plus difficile l'opération d'un service cohérent pour les sociétés de transport, parce que ces mélanges de gaussiennes impliquent plusieurs distributions de temps de parcours et plusieurs conditions de voyages. Ces mélanges de gaussiennes peuvent également causer des incohérences pour les expériences des passagers ou lors de la prédiction des heures d'arrivée (notamment pour alimenter l'information aux passagers). Il est donc important de mieux comprendre les segments dont les temps de parcours suivent des modèles de mélange.

Ce projet vise à fournir des analyses supplémentaires sur les distributions de temps de parcours pour que les sociétés de transport puissent en tenir compte lors de la planification et de l'amélioration de leurs services. Nous proposons d'abord d'identifier la présence de ces distributions de temps de parcours à l'échelle du réseau, ce qui permettrait d'obtenir des informations plus détaillées sur les distributions de mélange, afin de focaliser l'attention des planificateurs chez les sociétés de transport.

Ici, nous utilisons 1,5 année de données archivées sur la localisation des véhicules de transport en commun de Montréal comme étude de cas pour tester la présence des distributions de mélange dans les temps de parcours. Nous nous concentrons sur trois niveaux d'analyse, (1) le niveau de temps arrêt à arrêt, (2) le niveau des points de contrôles, et (3) le niveau des temps par voyage.

Nous visons à fournir de nouvelles informations à prendre en compte lors de l'amélioration des services existants, en identifiant les facteurs potentiels liés à ces distributions de mélange de temps de parcours. Nous utilisons d'autres attributs de l'environnement et de l'exploitation comme données pour créer plusieurs modèles de classification. Les modèles de classification aideront les sociétés de transport à focaliser leurs ressources lors de la planification ou de l'évaluation des mesures préférentielles pour les transports en commun, telles que les voies réservées et les feux prioritaires. En identifiant les facteurs associés, les agences peuvent ensuite améliorer la planification des temps de parcours.

2.5.2 Revue de la littérature

Les distributions des temps de parcours dans les transports en commun peuvent fournir des statistiques clés pour analyser la fiabilité du service, explorer les causes des variations de fiabilité et ajuster les horaires (Mazloumi al., 2010). Les distributions de temps de parcours sont également une donnée importante pour les modèles de simulation de transport en commun, tels que les simulations de correspondances (Bhaskar et al., 2017).

Les articles plus anciens ont tenté d'adapter les temps de parcours dans les transports en commun à différentes distributions paramétriques. Abkowitz et Engelstein (1984) ont montré que les temps de parcours suivent une distribution symétrique. Cependant, Mazloumi et al. (2010) ont montré que les temps de parcours pouvaient également suivre des distributions asymétriques, telles que des distributions log-normale ou gamma.

Les articles plus récents (Ma et al., 2014 ; Kieu et al., 2015 ; Wang, 2020) ont également observé ces distributions de mélange. Kieu et al. (2015) ont ajusté les temps de parcours avec plusieurs modèles de distribution paramétriques. Les distributions asymétriques, telles que la distribution log-normale, sont les mieux adaptées. Il y a quelques trajets qui présentent une distribution bimodale. Ma et al. (2014) ont aussi ajusté les temps de parcours sur plusieurs segments et ont montré que la distribution multimodale peut être estimée en utilisant un mélange de gaussiennes.

Étant donné que la distribution de mélange représente plusieurs distributions unimodales pondérées avec différentes probabilités, l'explication possible fournie par Ma et al. (2014) est que ces modèles existent en raison des conditions de circulation sous-jacentes, comme les temps de parcours sans ou avec congestion. Malheureusement, les auteurs n'ont pas discuté des causes de façon plus détaillée.

Nous voudrions noter ici que plus les données et l'échelle d'analyse deviennent précises, plus il est possible d'observer des variations plus détaillées. La vision plus agrégée fournie par la littérature précédente pourrait masquer les variations détaillées. Des recherches sont encore nécessaires pour déterminer plus de détail sur les distributions de temps de parcours et les causes des distributions de mélange.

2.5.3 Cadre de recherche et méthodologie

Nous proposons de remédier à ces limitations en produisant des statistiques sommaires à l'échelle du réseau concernant la présence des distributions de mélange à différents niveaux d'analyse afin

d'aider les agences à mieux comprendre la fiabilité des transports en commun. Le cadre de recherche est présenté à la Figure 2-10.

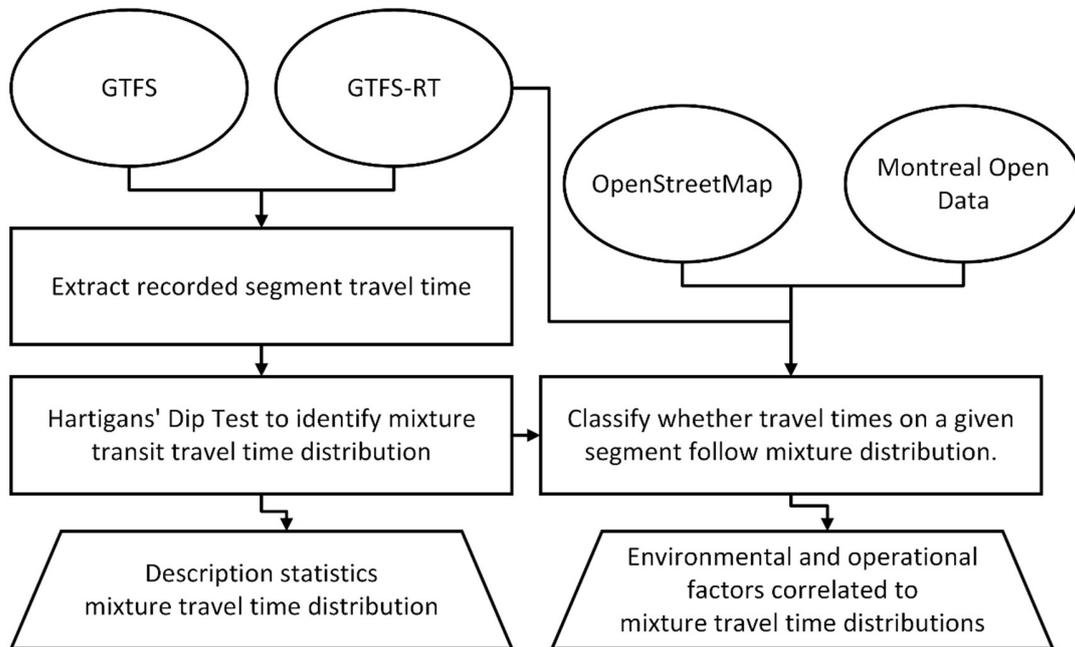


Figure 2-10. Méthodologie générale de la recherche

Plus précisément, la première étape de la recherche consiste à fusionner les données GTFS et GTFS Real-Time fournies par la STM afin d'extraire les temps de parcours aux différents niveaux. Ensuite, nous utilisons le test de Hartigans (Hartigan et Hartigan, 1985) pour identifier les distributions de mélange. Nous agrégeons ensuite les résultats pour fournir des statistiques descriptives relatives aux distributions de temps de parcours mixtes.

La deuxième partie de la recherche consiste à identifier les facteurs liés à la présence des distributions de mélange. Nous visons à fournir plus d'informations qui pourraient être utilisées par de futures recherches pour déduire la cause des variations de fiabilité des transports en commun. Pour ce faire, nous proposons de développer un modèle de classification sur la forme de la distribution en utilisant les données ouvertes disponibles sur OpenStreetMap et les données ouvertes de la ville.

2.5.4 Variations spatiales et temporelle des distributions de mélange

Chaque point de données correspond au pourcentage des temps de parcours qui suivent des distributions de mélange. Les variations au niveau des voyages sont montrées à la Figure 2-11. Il est intéressant de noter que les distributions de mélange sont moins présentes pendant les heures de pointe en semaine. Bien que le nombre de temps de parcours qui suivent les distributions de mélange soit plus élevé, il y a aussi beaucoup plus de distributions unimodales aux heures de pointe. Ceci est quelque peu contre-intuitif parce que les heures de pointe pourraient présenter une plus grande variation dans les conditions de voyage. L'une des hypothèses pourrait être que la grande variance des temps de parcours rend les modes (de la distribution) plus difficiles à séparer. Une autre hypothèse pourrait être que les services supplémentaires ajoutés pendant les heures de pointe ont des temps de parcours plus cohérents que les services planifiés à travers la journée.

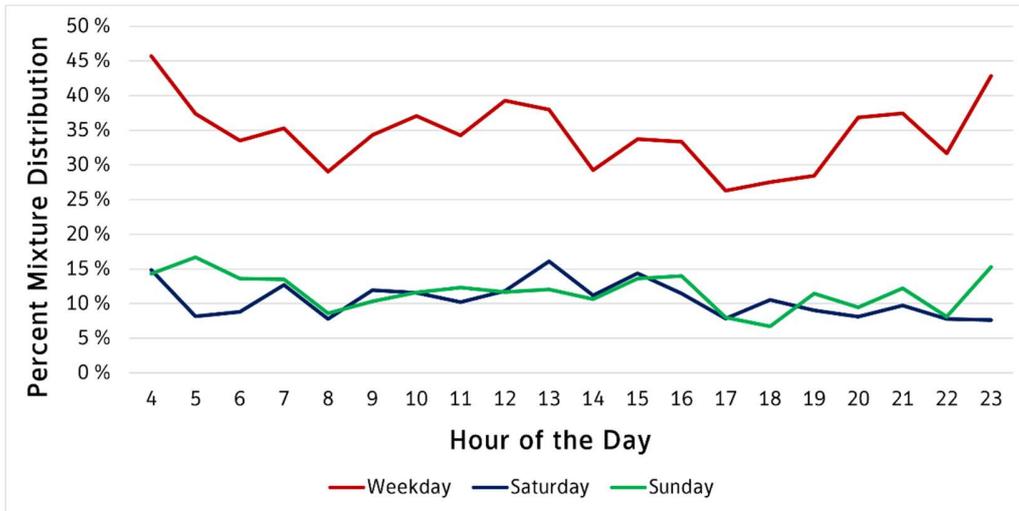


Figure 2-11. Variations temporelles par voyage

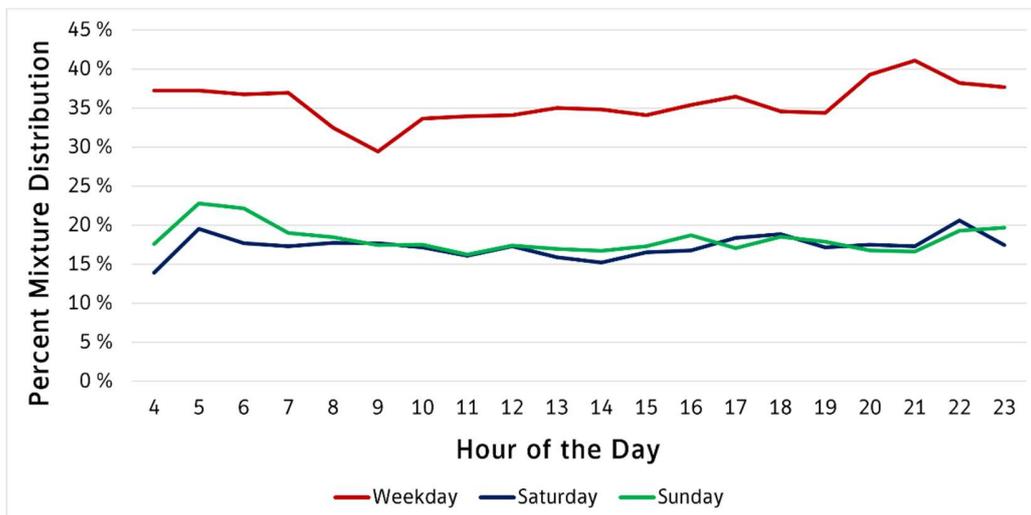


Figure 2-12. Variations temporelles au niveau des points de contrôle

Les variations au niveau des points de contrôle sont montrées à la Figure 2-12. Ici, nous pouvons observer une tendance plus stable, peut-être en raison de la quantité plus importante de données, puisqu'il y a plusieurs points de contrôle sur le parcours. Cependant, les distributions de mélanges contribuent à une plus grande proportion pendant la pointe du soir, mais à une plus petite proportion pendant la pointe du matin.

Les variations par paire d'arrêts sont montrées à la Figure 2-13. Nous pouvons observer que les distributions de mélange sont également assez stables. Cependant, contrairement aux observations précédentes, il y a deux petites augmentations du pourcentage autour des heures de pointe. La proportion de distributions mixtes augmente progressivement jusqu'à la pointe de l'après-midi pendant les fins de semaine.

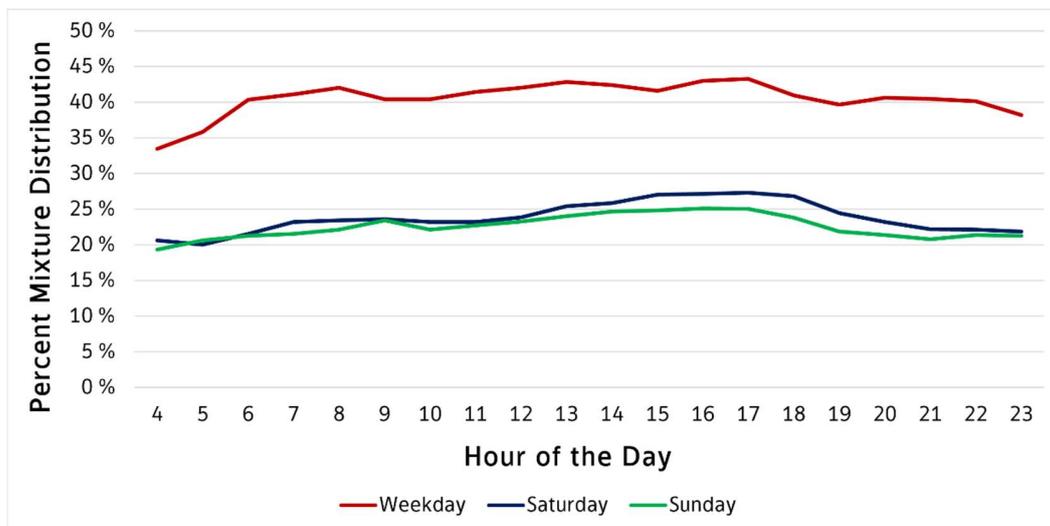


Figure 2-13. Variations temporelles par paire d'arrêts



Figure 2-14. Variations spatiales par paire d'arrêts

Pour les variations spatiales, la Figure 2-14 montre la distribution pour chaque paire d'arrêts sur une carte. Nous pouvons observer que le côté proche de l'est de la ville (ou géographiquement le côté nord-est) a plus de segments qui suivent des distributions de mélange. Les segments situés à proximité des axes principaux présentent également plus de distributions de mélanges. Ces quartiers ont tendance à avoir des densités de population plus élevées et une demande de transport en commun plus grande. Les classifications de rue ont tendance à être moins favorables à la voiture, avec des îlots courts et des feux de circulation à de courtes distances. Les banlieues, telles que l'ouest de l'île, présentent moins de distributions de mélanges. Ceci est également

attendu, parce que ces quartiers ont tendance à avoir moins de demande de transport en commun et des rues davantage conçues pour les voitures. Donc, nous émettons l'hypothèse que la densité de population, l'utilisation des sols et les paysages urbains pourraient également influencer la forme des distributions de temps de parcours. Les observations sont similaires pour les trois niveaux d'analyse.

2.5.5 Variables liées aux distributions de mélanges

Nous avons décidé de tester quatre méthodes de classification, qui comprennent des modèles linéaires et non linéaires, ainsi que des modèles basés sur la similarité. Cela nous permet de déterminer quelle méthode est la plus efficace pour déterminer si les temps de parcours sur un segment donné suivent des distributions de mélanges ou pas. Les méthodes de classification incluses ici sont la régression logistique (Hosmer et al., 2013), l'arbre de classification (Quinlan, 1987), la forêt aléatoire (Ho, 1995), et le K-voisinage (Cover and Hart, 1967).

Le Tableau 2-9 montre que les méthodes de la forêt aléatoire et du K-voisinage sont généralement plus performantes que celles de l'arbre de décision et de la régression logistique. Nous pouvons déduire deux informations de ces modèles. La première est que la relation entre les variables d'entrée et la variable de résultat pourrait être non linéaire. Une autre observation est que le modèle basé sur les similarités donne de bons résultats; ceci suggère que les segments similaires se comportent de la même manière. Cela suggère aussi une nouvelle méthode potentielle d'analyse des performances ou de planification à savoir que les sociétés de transport pourraient éventuellement regrouper les segments similaires lors de l'analyse des temps de parcours.

Tableau 2-9. Matrice de confusion pour les méthodes de classification aux différents niveaux d'analyse

	Arrêt		Point de contrôle		Voyage	
KNN	False	True	False	True	False	True
	0,78	0,22	0,81	0,19	0,73	0,27
	0,22	0,78	0,18	0,82	0,26	0,74
	Accuracy	0,78	Accuracy	0,81	Accuracy	0,73
Tree	False	True	False	True	False	True
	0,72	0,28	0,76	0,24	0,68	0,32
	0,28	0,72	0,24	0,76	0,31	0,69
	Accuracy	0,72	Accuracy	0,76	Accuracy	0,68
Forest	False	True	False	True	False	True
	0,80	0,21	0,85	0,15	0,73	0,27
	0,20	0,80	0,17	0,83	0,25	0,75
	Accuracy	0,80	Accuracy	0,84	Accuracy	0,74
Linear	False	True	False	True	False	True
	0,65	0,35	0,71	0,29	0,95	0,05
	0,39	0,61	0,31	0,69	0,81	0,19
	Accuracy	0,63	Accuracy	0,70	Accuracy	0,58

Les coefficients de régression logistique, présentés au Tableau 2-10, confirment les observations précédentes. Les variables binaires pour les services du samedi et du dimanche ont un signe négatif dans les trois modèles par rapport au cas de base des services en semaine. Les trois

modèles présentent des signes différents pour les heures de la journée comme les observations précédentes.

Tableau 2-10. Coefficients de régression logistique

	Stop		Timepoint		Route	
	Coeff	p	Coeff	p	Coeff	p
Intercept	-0,24	0,00	1,14	0,00	-0,01	0,97
Samedi	-0,84	0,00	-1,11	0,00	-1,56	0,00
Dimanche	-0,80	0,00	-1,00	0,00	-1,48	0,00
Avant pointe AM	0,04	0,02	0,32	0,00	-0,08	0,47
Pointe AM	0,10	0,00	0,06	0,03	-0,18	0,02
Pointe PM	-0,02	0,08	-0,05	0,06	-0,43	0,00
Soirée	0,01	0,55	0,05	0,11	-0,12	0,16
Nuit	0,05	0,00	0,19	0,00	-0,18	0,10
Fréquence	0,16	0,00	0,21	0,00	0,29	0,00
Nombre d'arrêts			-0,06	0,00	0,01	0,00
Nombre de rues	-0,07	0,00	-0,17	0,00	-0,01	0,14
Nombre de lumières	0,17	0,00	0,07	0,00	0,00	0,78
Nombre de voies	0,00	0,49	-0,01	0,38	-0,10	0,11
Limite de vitesse	0,00	0,30	0,00	0,01	0,02	0,00
Voie bus	0,00	0,75	0,00	0,01	0,00	0,97
Sens unique	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14
Densité population	0,03	0,00	0,02	0,00	0,02	0,14
Longueur - Résidentiel	-2,09	0,00	-0,47	0,00	0,00	0,89
Longueur – Collectrice	-1,78	0,00	-0,59	0,00	-0,08	0,00
Longueur - Secondaire	-0,96	0,00	-0,34	0,00	-0,03	0,01
Longueur - Primaire	-0,53	0,00	-0,03	0,30	0,04	0,01
Longueur – Autoroute	0,08	0,00	0,04	0,02	0,04	0,01
Utilisation du sol – mixte	0,00	0,01	0,00	0,00	-0,01	0,00
Utilisation du sol – CV	0,00	0,00	0,00	0,10	-0,01	0,00
Utilisation du sol - résidentiel	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00	0,58
Utilisation du sol – industriel	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,02
Charge moyenne	-0,07	0,00	0,22	0,00	0,02	0,47
Charge écart-type	0,13	0,00	-0,15	0,00	0,07	0,01
Retard moyen	0,08	0,00	-0,11	0,00	-0,04	0,12
Retard écart-type	0,00	0,42	0,01	0,00	0,00	0,94
Part des montants	0,00	0,00	-0,01	0,00	-0,02	0,00

La fréquence des services est une variable significativement positive pour les trois niveaux. Cette variable pourrait être corrélée à la variation des conditions de voyage sous-jacentes et des préférences des opérateurs. Les services fréquents sont en corrélation avec plus d'usagers et congestion aux arrêts et à bord. L'augmentation de la fréquence des services est également liée à l'augmentation du nombre de chauffeurs sur la ligne, qui signifie de possibles impacts des comportements de conduite des chauffeurs.

Le nombre de feux de signalisation est significatif et positif. La présence des feux de circulation sur un segment donné augmenterait les chances d'avoir des distributions de mélange. C'est attendu, parce que les temps de parcours avec ou sans attente à un feu de circulation sont beaucoup plus faciles à distinguer à une échelle plus microscopique.

La densité de population est également positive. C'est attendu, parce que la densité de population est corrélée à une plus grande demande de transport en commun, à la congestion routière, ainsi qu'à des activités d'utilisation du sol plus diversifiées. Tous ces facteurs pourraient contribuer à la variation des conditions de déplacement.

2.5.6 Conclusions

Les résultats montrent la présence de distributions de mélanges aux différents niveaux d'analyse. Une analyse future pourrait aider les agences à identifier la cause de ces distributions mixtes, et donc à améliorer les conditions de déplacement des bus. Les statistiques au niveau des points de contrôle et par paires d'arrêts restent relativement stables tout au long de la journée. Cependant, la variation au niveau des voyages est plus grande, peut-être en raison du plus faible nombre d'observations. Les services de fin de semaine ont moins de segments suivant des distributions de mélanges. Mais, cela pourrait également être dû à un plus faible échantillon.

La distribution géographique montre que les segments situés à proximité des feux de circulation ou sur les axes principaux ont tendance à avoir plus de distributions de mélanges. Les quartiers où la demande de passagers est plus forte, la densité de population plus élevée, et l'utilisation du sol mixte pourraient avoir plus de segments suivant des distributions de mélanges.

Les modèles de classification ont montré que les méthodes non linéaires et les modèles basés sur la similarité sont les plus efficaces pour classer la forme des distributions de temps de parcours. Les résultats soulignent la nécessité de prendre en compte la non-linéarité et suggèrent que les segments similaires ont tendance à se comporter de la même manière. Les sociétés de transport pourraient potentiellement essayer de programmer les horaires sur les segments similaires au même moment.

Le modèle de régression logistique a mis en évidence les effets potentiels des variations de la demande de passagers, des services en semaine, des préférences des opérateurs, les interactions entre véhicules, les feux de circulation, et les longueurs des segments. Ces résultats pourraient aider les sociétés de transport à concentrer leur attention et leurs ressources lorsqu'elles tentent d'améliorer les conditions de déplacement pour les véhicules.

Les limites de cette recherche pourraient se situer dans les domaines suivants. La première concerne la méthodologie. Dans nos analyses, nous agrégeons l'ensemble des données sans tenir compte des changements de service qui ont eu lieu pendant la période de l'étude. Des recherches supplémentaires pourraient examiner les variations saisonnières potentielles dans les distributions de mélanges. Une autre limite est que nos modèles de classification n'incluaient qu'une variable de résultat binaire, en raison de la taille de données plus petite pour les segments ayant un plus grand nombre de composantes. Des recherches futures pourraient analyser plus en détail ces segments.

Une extension possible de cette recherche est d'utiliser des données plus détaillées sur l'achalandage et les phasages des feux de circulation pour aider à déduire la raison des conditions de voyage plus lentes. En utilisant les causes identifiées, les agences peuvent cibler les segments spécifiques, éventuellement accélérer les temps de parcours et améliorer la cohérence du service. Ensuite, les sociétés de transport pourraient également utiliser des données historiques pour

mieux évaluer les mesures préférentielles pour les bus, telles que la priorité aux feux de signalisation et les voies réservées aux bus. Les agences pourraient analyser les distributions de temps de parcours avant et après la mise en services de ces mesures afin de déterminer l'efficacité de ces stratégies en utilisant les distributions de temps de parcours sous-jacentes. De cette façon, les agences pourraient avoir une meilleure compréhension de l'impact de ces stratégies sur les services. Les agences pourraient également intégrer ces distributions de temps de parcours plus précises dans les autres analyses afin de mieux comprendre l'expérience des passagers, telles que les simulations de correspondances. Enfin, les agences de transport en commun pourraient utiliser ces informations pour fournir aux passagers des informations plus précises sur la planification de leurs déplacements.

2.6 Méthodologie d'évaluation de la qualité des accès actifs aux stations de métro

- Par : Eya Chékir, maîtrise
- Supervision : Pre Catherine Morency
- Contexte : Chaire Mobilité
- Fin projetée : août 2023

2.6.1 Objectifs

Ce projet de recherche a différents objectifs :

- Définir les bassins d'attraction (accessibilité active) autour des stations de métro ;
- Développer des indicateurs pour déterminer la qualité de l'accès aux stations, incluant la caractérisation de l'environnement bâti pour mieux comprendre et évaluer l'attractivité du transport en commun (via son accessibilité active) ;
- Proposer une méthodologie systématique et transposable à tout arrêt de transport en commun apte à diagnostiquer les bassins d'attraction des arrêts de transport en commun.

2.6.2 Revue de littérature

La marche est un mode de transport important car elle est accessible à tous les autres modes de transport. Ainsi, la marche fait partie de la ville; elle contribue à la dynamique des transports. Elle est en effet incontournable pour utiliser les transports en commun. L'amélioration de ses conditions pourrait faciliter les transports en général, l'accès au travail et l'accès aux différents lieux de loisirs et de commerce. De plus, les transports publics, considérés comme plus durables, ont de grands espoirs pour surmonter la crise climatique. L'attractivité de ce mode, notamment la facilité d'accès à pied à ses différents points d'accès, a été remise en cause (Keller et al. 2022). De plus, l'utilisation des transports publics joue un rôle important dans la lutte contre la sédentarité et la pratique d'une activité physique. Dans leurs travaux, Morency et al. (2011) énoncent qu'accéder au transport en commun couvre en moyenne 25 % du niveau d'activité physique recommandé quotidiennement. Une autre étude de 2021 (Mageau-Beland et Morency 2021) indique que 54% de l'activité physique quotidienne recommandée peut être atteinte par les usagers actuels du transport en commun. Il existe donc une interaction pertinente entre la marche et l'utilisation des transports en commun.

2.6.2.1 La marchabilité

La marchabilité est devenu un sujet important à traiter dans nos sociétés modernes, qui tendent à favoriser la pratique de la marche comme premier moyen de déplacement. Définir la notion de marchabilité prête en revanche à confusion. Les travaux de Dalmat (2021), insistent sur le fait que malgré la présence de preuves témoignant que la variation de l'environnement bâti est associée à la variation de la pratique de la marche, la mesure de la marchabilité d'un lieu donné reste problématique compte tenu des environnements bâtis mesurés de manière incohérente. En effet, il évoque le fait que sur les six articles publiés identifiés dans une revue systématique à portée étroite de 2015 sur la relation entre les mesures de potentiel piétonnier basées sur les systèmes d'information géographique et les pas mesurés objectivement par jour, aucune étude n'a utilisé le même ensemble de variables pour représenter le potentiel piétonnier (Dalmat 2021).

2.6.2.2 Facteurs qui influencent la marchabilité

La marchabilité ne peut être introduite comme étant une entité unique et universelle. En effet, les facteurs de l'environnement bâti ont un rôle capital à jouer en ce qui concerne la marche. D'autres facteurs ont aussi un impact sur la marchabilité : les caractéristiques des piétons

(jeune/âgé, homme/femme, en forme/avec limitations), le but de la marche (travail/loisir), le contexte urbain et d'autres aspects environnementaux et culturels (Moura 2017). Dans les travaux réalisés se concentrant sur les facteurs influençant la marchabilité (Bonnel 2002; Ewing et Cervero 2010), il est question de quatre facteurs majeurs regroupant des variables caractérisant l'individu et le ménage, le déplacement en soi, les différents moyens de transport proposés, ainsi que l'environnement urbain.

2.6.3 Méthodologie

Pour pouvoir délimiter le bassin d'attraction autour d'une station de métro l'approche suivante est utilisée. En premier lieu, nous générons des points aléatoires près de chaque station. Nous utilisons pour cela le réseau routier de la ville de Montréal à partir duquel on génère des points aléatoires équidistants de 15 mètres. Nous les considérons par la suite être comme nos points d'origine d'un déplacement. La station de bus ou l'accès à la station de métro ou l'entrée d'une gare, est considérée comme destination visée. Ces points étant définis nous pouvons créer une base de données prête à être utilisée dans un calculateur de chemins pour obtenir le trajet de marche tenant compte de l'environnement bâti pour obtenir de l'information sur du temps de marche et la distance parcourue pour aller de l'origine vers le point d'accès en transport en commun. On utilise durant ce projet, le logiciel Transition. La distance de chaque parcours obtenu est ensuite utilisée pour délimiter les zones où la distance de parcours est inférieure à 200 mètres, 400 mètres, 600 mètres, 800 mètres et 1000 mètres. Les surfaces obtenues sont considérées comme les bassins d'attraction autour des stations. Si une station de métro possède plusieurs entrées, cette méthodologie est appliquée pour chaque entrée individuellement puis des bassins d'attraction sont générés. Puis le bassin d'attraction résultant pour la station est le regroupement de tous les bassins d'attraction générés pour chacun de ses différents accès. Une fois ces zones définies, nous développons différents indicateurs pour comparer les résultats entre les stations de métro et faire des hypothèses sur leur niveau d'accessibilité.

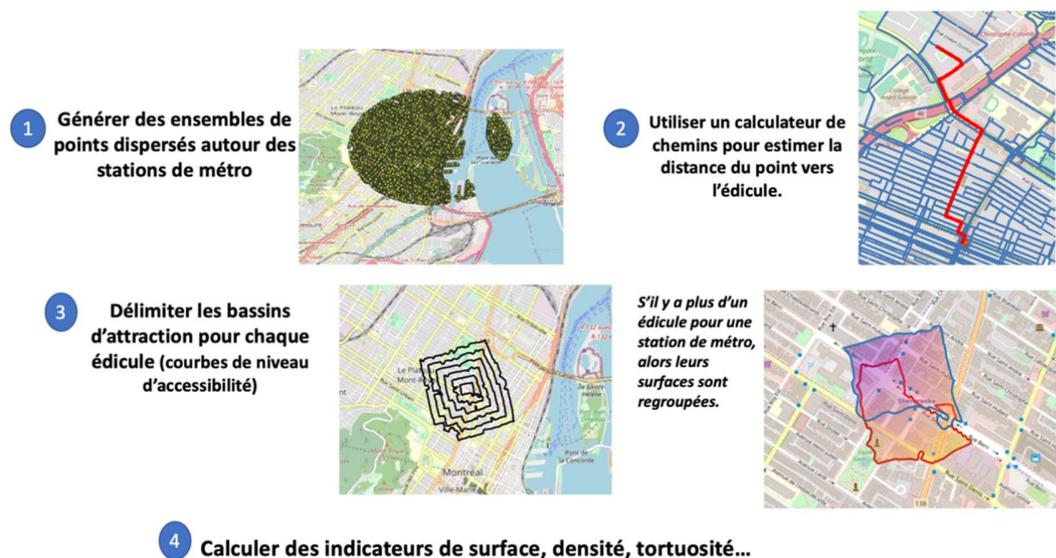


Figure 2-15. Méthodologie de délimitation des bassins d'attraction

2.6.3.1 Sélection des stations à étudier

Pour cette étude nous nous focalisons sur le métro de Montréal. La ligne orange, également connue sous le nom de ligne 2 du métro de Montréal, est la ligne la plus importante et la plus

ancienne du réseau du métro en raison de sa charge, de sa longueur et du nombre de stations. La ligne relie également le secteur de l'île de Montréal au secteur de la ville de Laval. Elle traverse également plusieurs quartiers du centre de Montréal. Cela crée des connexions entre plusieurs quartiers.

2.6.3.2 Choix des indicateurs

Pour les courbes de niveaux relatives aux stations étudiées, les analyser, les comparer et comprendre les facteurs qui influencent leurs propriétés, plusieurs indicateurs sont envisagés. Ainsi on peut classer les différents indicateurs abordés dans notre étude en trois catégories, tel que représenté dans la Figure 2-16. Des indicateurs servant à caractériser la géométrie des courbes de niveaux d'accessibilité, à caractériser les trajets et à caractériser l'environnement bâti et réseaux à l'intérieur des courbes de niveaux d'accessibilité. Ainsi le travail fait pour délimiter les bassins d'attraction, permet de mieux comprendre les conditions réelles d'accès aux stations de métro. Les différents indicateurs présentés permettent de comparer différentes stations, montrant la diversité des contextes d'accès.

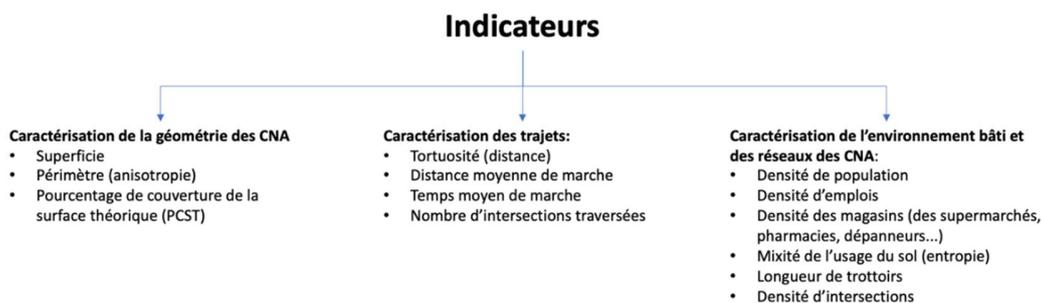


Figure 2-16. Indicateurs de caractérisation des bassins d'attraction

2.6.4 Résultats

La création de bassins d'attraction autour des stations de métro sur la ligne orange nous donne comme prévu des formes géométriques très différentes de cercles. La Figure 2-17, montre les courbes de niveaux d'accessibilité relatives à chaque station de métro de la ligne orange. Ces courbes sont comme expliqués dans la méthodologie, issues des résultats donnés par le calculateur « Transition ». Il a été utilisé pour générer des trajets de parcours réel ce qui nous a aidé à englober les surfaces dont les distances de parcourir sont pareilles. Visuellement, nous pouvons remarquer qu'en fonction des nœuds d'accès étudiés nous n'avons pas les mêmes formes de courbes de niveaux d'accessibilité ou étalement car chaque zone étudiée a des caractéristiques propres. Plus on se rapproche du centre-ville, plus les courbes de niveaux d'accessibilité des différentes stations se rapprochent et se chevauchent.

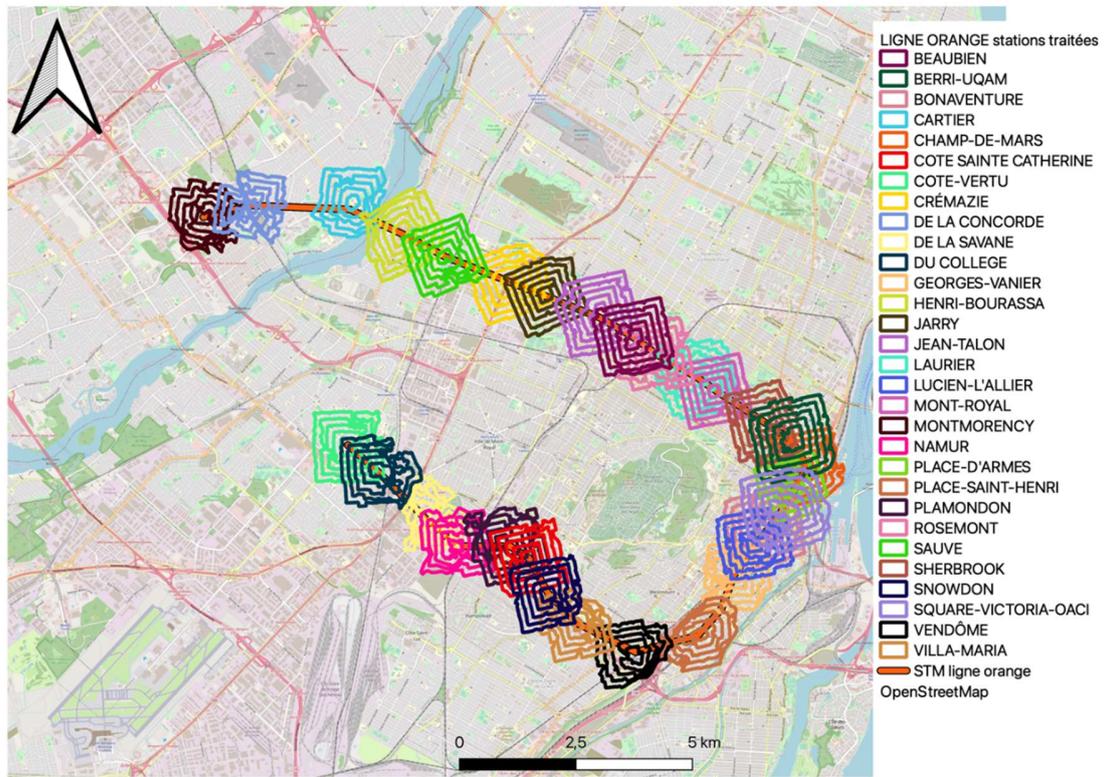


Figure 2-17. Les bassins d'attraction

2.7 Étude des déménagements dans un contexte pandémique

- Par : Mathilde Zanolini, maîtrise
- Supervision : Pre Catherine Morency
- Contexte : Chaire Mobilité
- Fin prévue : août 2023

2.7.1 Introduction

Depuis plusieurs décennies, et plus encore ces dernières années en raison de la pandémie de COVID-19, le phénomène de l'étalement urbain s'accroît. Les ménages quittent les centres-villes pour s'installer en banlieue où les prix du foncier sont généralement plus abordables. Cet éloignement entraîne une augmentation des distances de déplacement et de la dépendance à l'automobile, générant des coûts de transport importants (Allard et al., 2014). Dans ce contexte, les villes sont confrontées aux défis de la réduction de l'empreinte des déplacements quotidiens, et les solutions qui se présentent sont souvent axées sur la réduction de la dépendance à l'automobile, ce qui revient à essayer de changer la manière dont les déplacements sont effectués. Cependant, il serait également possible, et peut-être plus durable, pour ces municipalités de proposer des stratégies visant à générer des changements qui affectent la structure spatio-temporelle des déplacements. L'un de ces changements structurels concerne le choix du lieu de résidence, car il est bien connu que la localisation est l'un des principaux moteurs du comportement de déplacement. Il est donc essentiel de comprendre comment les ménages choisissent leur lieu de résidence afin d'aider les politiciens et les planificateurs à proposer des stratégies qui encouragent les gens à choisir leur lieu de résidence de manière plus judicieuse par rapport à leurs besoins de déplacement (Morency & Verreault, 2020).

Comprendre les étapes et l'articulation du choix d'un lieu de résidence par les ménages apparaît ainsi primordial dans le but d'aider les politiciens et les planificateurs à proposer des stratégies qui encouragent les gens à choisir leur lieu de résidence de manière plus judicieuse par rapport à leurs besoins de déplacement. Cette étude vise ainsi à comprendre quelles sont les motivations et les caractéristiques des ménages qui les poussent à se relocaliser.

2.7.2 Données

En 2020 et 2021, la Chaire mobilité de Polytechnique Montréal a mené une enquête dans la RMR de Montréal sur les changements d'habitudes causés par la pandémie. Le questionnaire comprend des questions sur les caractéristiques du ménage (taille du ménage, motorisation, revenu, adresse), sur le logement (type de logement, mode d'occupation), sur les personnes composant le ménage (sexe, âge, profession, possession d'un permis de conduire), sur les impacts de la pandémie sur les habitudes de déplacement (motorisation, achats en ligne, déplacements et utilisation des modes de transport) et sur la réflexion sur le lieu et le type de résidence. C'est sur ce dernier point que se concentre cette analyse. Il s'agit en effet d'une source de données intéressante pour tenter de comprendre les éléments qui conduisent les ménages à décider de déménager. L'enquête ayant été partagée sur les réseaux sociaux, l'échantillon de réponses obtenu est un échantillon opportuniste. L'échantillon collecté en 2020 comprend 1620 ménages, tandis que celui de 2021 compte 936 répondants. Dans l'étude, ces deux échantillons ont été combinés pour former un échantillon agrégé de 2556 observations. Les observations pour lesquelles la variable sur la volonté de se relocaliser était manquante ont été supprimées (17 observations) et une variable contenant les informations sur l'année d'enquête a été créée. La base de données utilisée dans cette étude comporte ainsi 2539 observations.

L'objectif de l'étude est de déterminer quelles sont les caractéristiques d'un ménage et de sa localisation résidentielle qui exercent une influence sur sa volonté de se relocaliser et sur les raisons motivant cette volonté. Pour cela plusieurs variables caractérisant la structure du ménage, sa motorisation, son logement au moment de l'enquête ainsi que son lieu de résidence ont été utilisées telles que présentes dans l'enquête ou bien calculées.

Pour caractériser la structure des ménages, le choix s'est porté sur le calcul de typologies. Les typologies de ménages utilisées ont été développées par Fabre à partir des données des enquêtes de déplacements des ménages de Montréal (Fabre, 2018). Cette typologie comprend huit types de ménages mutuellement exclusifs. Elle est basée sur la structure du ménage et les caractéristiques sociodémographiques de ses membres. La méthode employée pour définir les types est le clustering avec l'algorithme des k-moyennes. Les variables sur lesquelles se base l'algorithme sont la taille du ménage, l'âge moyen des membres du ménage, l'amplitude maximum des âges, le nombre de personnes de 11 ans et moins et le nombre de personnes de 76 à 84 ans. Les huit types de ménages et leurs caractéristiques sont présentés dans le Tableau 2-11 Description des typologies de ménages.

Tableau 2-11 Description des typologies de ménages

Type de ménage	% de l'échantillon		Ménage moyen							
			Taille		Age		Nombre d'enfants de moins de 12 ans		Nombre de personnes de 75 ans et plus	
	Enquête COVID-19 2020 et 2021	Enquête OD 2018	Enquête COVID-19 2020 et 2021	Enquête OD 2018	Enquête COVID-19 2020 et 2021	Enquête OD 2018	Enquête COVID-19 2020 et 2021	Enquête OD 2018	Enquête COVID-19 2020 et 2021	Enquête OD 2018
Sexagénaires	16,1	26,2	1,6	1,5	63,4	64,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Familles multigénérationnelles	2,7	3,0	4,1	3,8	37,8	39,2	0,7	0,6	0,1	0,1
Jeunes couples	30,0	15,2	1,9	1,6	30,1	30,5	0,0	0,0	0,0	0,0
Adultes et personnes âgées	2,3	3,7	2,8	2,6	58,5	59,6	0,0	0,0	0,2	0,3
Retraités	2,6	14,5	1,6	1,4	75,0	78,4	0,0	0,0	0,5	0,6
Très jeunes familles	21,2	14,3	4,0	3,9	23,3	22,9	1,5	1,5	0,0	0,0
Cinquantennaires	12,2	11,5	1,4	1,5	48,2	49,9	0,0	0,0	0,0	0,0
Jeunes familles	12,9	11,7	3,4	3,2	36,8	37,4	0,1	0,1	0,0	0,0

Comme cette étude est basée sur un échantillon opportuniste, il semblait important de comparer cet échantillon aux données plus couramment utilisées dans la littérature. Ainsi, le même processus de classification a été appliqué aux données de l'enquête Origine-Destination (OD) (l'enquête OD est une enquête sur les déplacements réalisée tous les cinq ans dans la région du Grand Montréal), ce qui nous a permis de comparer les deux échantillons afin de déterminer si notre échantillon peut être considéré comme représentatif. Les différences les plus importantes entre les deux échantillons résident dans la proportion de chaque type de ménage dans l'échantillon total. Dans l'enquête COVID-19, les " Très jeunes familles " et les " Jeunes couples "

représentent respectivement 21,2% et 30,0% de l'échantillon, alors qu'ils ne représentent que 14,3% et 15,2% dans l'enquête OD. À l'inverse, les ménages sexagénaires et les retraités sont sous-représentés dans notre échantillon. Cette sous-représentation des ménages plus âgés semble logique puisque l'enquête COVID-19 a été réalisée uniquement par Internet. Compte tenu de ces différences, notre échantillon ne peut être considéré comme représentatif. Cependant, les catégories sous-représentées sont des catégories de ménages qui devraient avoir une mobilité résidentielle plus faible que les autres, de sorte que les résultats de notre étude peuvent toujours être utilisés pour expliquer la mobilité résidentielle des jeunes ménages.

Afin de caractériser le lieu de résidence des ménages au moment de l'enquête, les mesures de proximité de Statistique Canada ont été utilisées. Statistique Canada a publié une base de données qui contient 10 mesures de proximité. Chaque mesure est basée sur un modèle de gravité qui considère la distance entre un îlot de diffusion (BD) de référence et tous les BD dans lesquels le service est situé (à une distance donnée) et la taille des services. Ces mesures sont présentées sous forme de valeurs normalisées à l'échelle nationale, variant sur une échelle de 0 à 1, 0 indiquant la plus faible proximité et 1 la plus forte proximité au Canada (Gouvernement du Canada, 2020). Pour faciliter l'analyse, ces mesures ont été normalisées au niveau de la RMR de Montréal. L'analyse descriptive des dix variables de proximité utilisées est présentée dans le Tableau 2-12 Analyse descriptive des variables de proximité.

Tableau 2-12 Analyse descriptive des variables de proximité

	Moyenne	Minimum	1 ^{er} Quartile	Médiane	3 ^{ème} Quartile	Maximum
Emploi	0,20	0,00	0,05	0,17	0,33	1,00
Pharmacie	0,17	0,00	0,04	0,12	0,25	1,00
Garderie	0,29	0,00	0,12	0,26	0,43	1,00
Centre de santé	0,10	0,00	0,02	0,06	0,15	1,00
Épicerie	0,21	0,00	0,06	0,15	0,29	1,00
École primaire	0,27	0,00	0,10	0,23	0,41	1,00
École secondaire	0,15	0,00	0,06	0,13	0,21	1,00
Bibliothèque	0,13	0,00	0,05	0,10	0,17	1,00
Parc	0,11	0,00	0,04	0,08	0,14	1,00
Transport public	0,16	0,00	0,06	0,15	0,23	1,00

Un résumé des variables utilisées dans notre étude est présenté dans le Tableau 2-13.

Tableau 2-13 Résumé des variables utilisées dans le modèle de régression sur la volonté de se relocaliser

	Variable	Type de variable	Analyse descriptive		Description
Dépendant	Prévoit déménager	Binaire	Oui: 35,5% (901) Non: 64,5% (1638)		Réponse à la question « Est-ce que la pandémie et les différentes périodes de confinement vous font réfléchir à votre lieu de résidence et à votre type de résidence ? »
	Année	Binaire	2020 : 63,1% (1603) 2021 : 36,9% (936)		L'observation provient de l'enquête de 2020, par opposition à l'enquête de 2021
	Typologie de ménage	Catégorielle	Voir Tableau 2-11		Les huit types de ménages développés par Fabre
Indépendant	Nombre de voitures	Continue	Minimum : 0,0 1 ^{er} quartile : 0,0 Médiane : 1,0 Moyenne : 1,1 3 ^{ème} quartile : 2,0 Max : 7,0		Le nombre de voitures personnelles possédées par les membres de la famille
	Nombre de permis de conduire	Continue	Minimum : 0,0 1 ^{er} quartile : 1,0 Médiane : 2,0 Moyenne : 1,8 3 ^{ème} quartile : 2,0 Max : 6,0		Le nombre de permis de conduire détenus par les personnes du ménage
	Mode d'occupation	Binaire	Propriétaire: 60,4% (1510) Locataire: 39,6% (992)		Le ménage est propriétaire du logement, contrairement à un ménage qui loue son logement
	Type de logement	Catégorielle	Condominium : 40,0% (1016) Plex : 14,5% (368) Maison de ville : 6,5% (164) Maison jumelée : 8,2% (207) Maison individuelle : 29,9% (759) Autre: 0,7% (17) Ne sait pas: 0,3% (8)		Le type de logement dans lequel vit le ménage
	Revenu annuel	Catégorielle	Moins de 30 000CAD : 7,8% (198) Entre 30 000 et 60 000 CAD : 13,4% (341) Entre 60 000 et 90 000 CAD : 17,2% (437) Entre 90 000 et 120 000 CAD : 14,5% (368) Entre 120 000 et 150 000 CAD : 10,5% (266) Entre 150 000 et 180 000 CAD : 7,2% (182) Entre 180 000 et 210 000 CAD : 5,4% (138) Plus de 210 000 CAD : 6,2% (158)		Le revenu annuel du ménage

			Ne sait pas: 1,8% (45)
			Refus: 6,5% (165)
			NA : 9,5% (241)
Proximité aux services	Continue	Voir Tableau 2-12	L'indice de proximité élaboré par Statistique Canada

2.7.3 Modèles

Bien que la conception d'un modèle joint de la volonté de déménager et des raisons influençant ce choix soit tout à fait pertinente lorsque l'on s'intéresse au phénomène de relocalisation (Eluru et al., 2009; Kortum et al., 2012), deux études distinctes ont été choisies. La modélisation conjointe de la décision de déménager/rester et des principales raisons motivant cette décision permet en effet de traiter les raisons comme endogènes au choix de se relocaliser (Kortum et al., 2012). Toutefois, dans notre cas, les raisons ne sont présentes que pour les 889 ménages envisageant de se relocaliser, la question sur les raisons n'étant pas posée aux ménages ayant répondu qu'ils ne souhaitent pas se relocaliser. Le fait d'analyser séparément la décision de déménager ou non et ensuite les raisons qui motivent le choix de se relocaliser permet, dans un premier temps, de conserver un grand nombre d'observations et de ne pas négliger l'étude des caractéristiques qui influent sur le fait de vouloir rester dans son logement actuel. Dans un second temps, seuls les ménages souhaitant déménager sont étudiés, ce qui permet de mettre en avant des tendances au sein de ce groupe particulier.

La méthode retenue pour analyser les corrélations entre les variables explicatives et la variable sur la volonté de déménager est la régression par arbre de décision (Yi & Kim, 2018). Un arbre de décision est une méthode systématique d'exploration de données qui crée un ensemble de feuilles et de branches sur la base de règles de segmentation. Le but de l'étude est d'identifier les caractéristiques des ménages et de leur résidence les plus déterminantes sur la volonté de relocalisation mais aussi de faire apparaître des combinaisons de variables pertinentes pour l'étude de ces choix. Les arbres de décision ont été choisis car généralement, ils produisent des résultats faciles à expliquer et offrent une possibilité de visualisation qui favorise l'interprétation des décisions du modèle (Rudd & Priestley, 2017). Un autre avantage de cette méthode est qu'elle permet de traiter à la fois des variables continues et catégorielles, ces dernières étant fréquentes dans notre étude. En outre, cette méthode expose non seulement la diversité des structures qui influence la décision de se relocaliser, mais aussi les principales caractéristiques qui forment ces diverses structures (Yi & Kim, 2018).

Dans cette étude, la méthode d'arbres de décision par partitionnement récursif est utilisée, grâce à la fonction `rpart()` du logiciel R. Cette fonction permet de construire un arbre qui minimise l'indice d'impureté de Gini, tout en vérifiant trois critères d'arrêt : une division ne peut être tentée que si le nœud courant contient au moins 20 observations et si les nœuds résultant présentent au moins 7 observations et l'indice de Gini global s'améliore de c_p , le paramètre de complexité. L'impureté d'un nœud d'arbre de décision est définie comme suit :

$$Gini(node) = 1 - p_{Stay}^2 - p_{Move}^2$$

L'indice d'impureté de Gini d'un arbre découle de l'impureté de chaque nœud :

$$Gini(tree) = \sum_{\text{each node}} \frac{\text{number of observations in the node}}{\text{number of observations in the tree}} * Gini(node)$$

La fonction `rpart()` permet également de mesurer, pour l'ensemble des paramètres de complexité c_p , et grâce à la validation croisée, les performances prédictives des arbres correspondants (c'est-à-dire la proportion d'observations pour lesquelles le choix prédit ne correspond pas au choix observé). Le modèle avec le plus petit c_p est donc celui qui génère le plus grand nombre de division, et par conséquent le plus grand nombre de feuilles de l'arbre. Pour concilier le pouvoir prédictif et la pertinence des résultats du modèle, nous avons choisi de retenir le plus grand arbre pour lequel l'erreur relative par validation croisée (relative cross-validated error) est inférieure à la somme de l'erreur standard et l'erreur relative par validation croisée de l'arbre à l'erreur relative par validation croisée la plus faible (Foley, s. d.).

Une fois le meilleur modèle sélectionné, l'analyse des résultats se fait sur la base de l'arbre de décision et des mesures de l'importance de chacune des variables incluses dans le modèle. En effet, l'importance des variables est mesurée par l'amélioration globale de l'indice de Gini produite par les nœuds dans lesquels elle apparaît, contrairement aux décisions de division de l'arbre qui sont prises en fonction de l'impureté. Ainsi, les variables aux nœuds ne sont pas nécessairement les variables les plus importantes pour le modèle complet.

La partie de l'étude qui se concentre sur les raisons motivant le déménagement est basée sur une méthode d'exploration d'ensembles d'éléments fréquents et d'apprentissage de règles d'association à l'aide du logiciel Python. L'algorithme Apriori, présent dans la bibliothèque `mlxtend` (machine learning extension) de Python, fonctionne en identifiant les éléments individuels fréquents rencontrés dans la base de données et les étend à des ensembles d'éléments de plus en plus grands, à condition que la fréquence d'apparition de ces combinaisons d'éléments soit suffisamment importante (« Algorithme APriori », 2021).

2.7.4 Résultats

Afin d'obtenir une estimation de la répartition des ménages souhaitant déménager au sein de la RMR de Montréal, nous avons cartographié le taux de répondants exprimant un désir de déménager. Les réponses ont été agrégées au niveau du secteur municipal, et seuls les secteurs comptant plus de 10 répondants ont été affichés. Les résultats sont présentés dans la Figure 2-18.

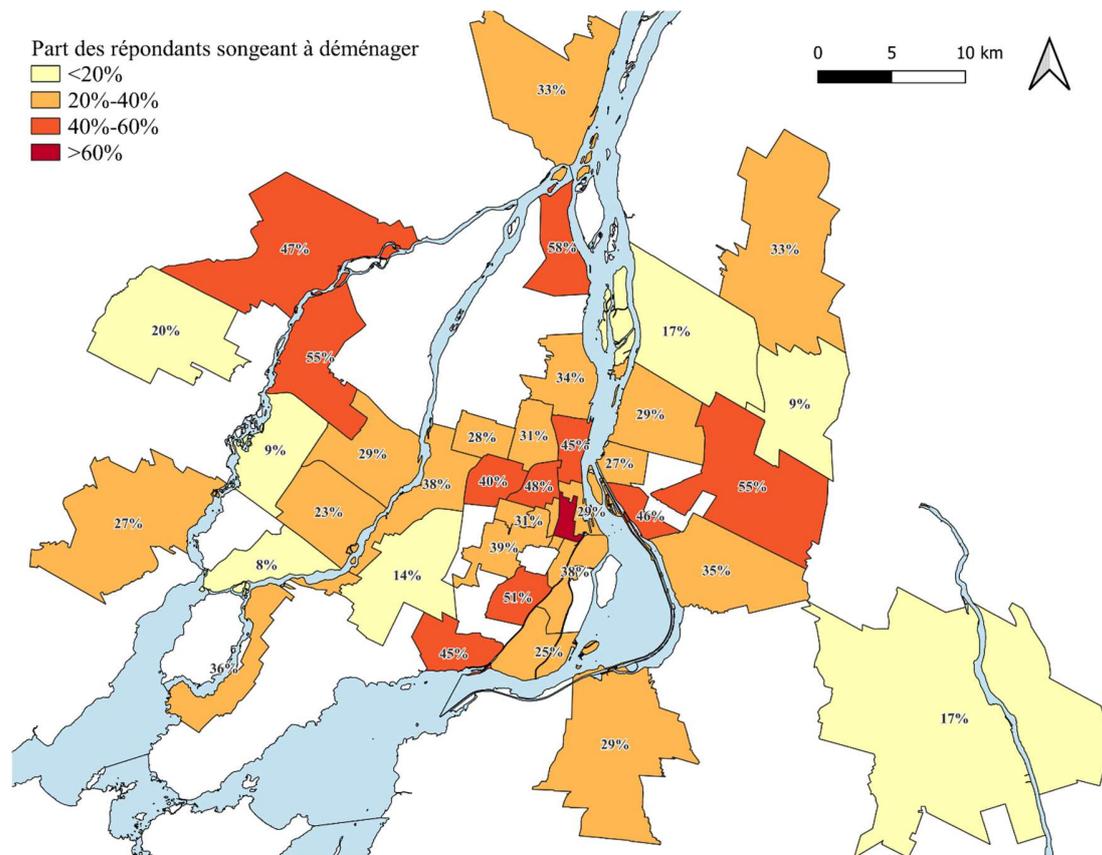


Figure 2-18 Volonté des ménages de déménager selon le secteur municipal de résidence (Chaire Mobilité, 2020)

Les zones où la volonté de déménager est la plus élevée sont le centre-ville de Montréal (101), Pointe-aux-Trembles (113), Longueuil : Saint-Hubert (307) et Laval : Vimont, Auteuil (405). Les arbres de décision calculés ci-dessous nous permettront de déterminer quelles sont les caractéristiques de ces secteurs et de leurs habitants qui les poussent à vouloir déménager.

Le premier arbre de décision que nous avons calculé possède cinq feuilles, cette taille permettant un taux d'erreur relative satisfaisant tout en conservant des résultats pertinents à analyser.

La Figure 2-19 présente l'arbre de décision sur la volonté de se relocaliser des ménages. En haut, le nœud principal regroupe 100% de l'échantillon des répondants. La première variable qui sépare cette population est le type de ménage. Pour les ménages " Jeunes couples ", deux groupes sont alors formés : les répondants 2021 et les répondants 2020. Ces derniers sont ensuite distingués par le mode d'occupation de leur logement (propriétaire ou locataire). Enfin, le groupe des locataires est séparé en deux parties : les ménages dont le revenu annuel est compris entre 30 000 et 60 000 CAD et ceux dont le revenu est inférieur à 30 000CAD ou supérieur à 60 000CAD.

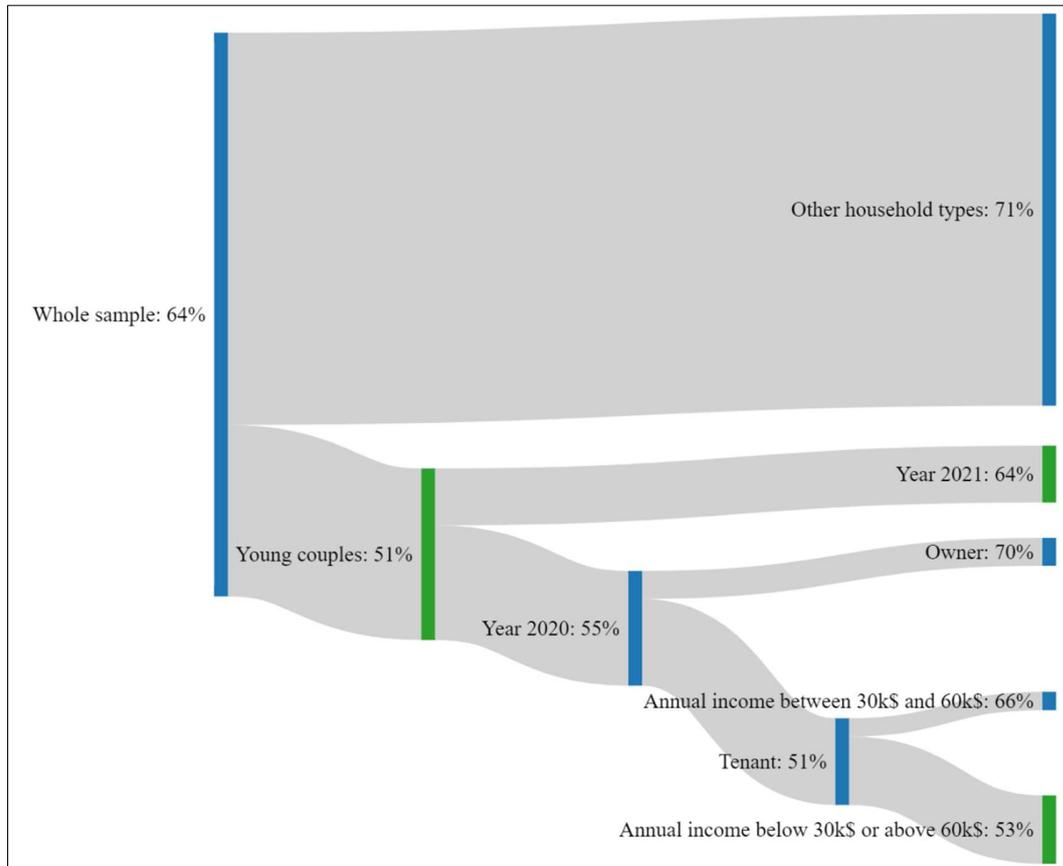


Figure 2-19 Arbre de décision de la volonté des ménages de se relocaliser (Bleu = n'envisage pas déménager et Vert = envisage déménager)

Cet arbre de décision est donc composé de cinq "feuilles" :

1. Les ménages autres que les "Jeunes couples" (1392 ménages) qui ont une probabilité de 71% de rester dans leur logement actuel ;
2. Les jeunes couples ayant répondu à l'enquête en 2021 (202 ménages) qui ont une probabilité de 64% de déménager ;
3. Les jeunes couples qui ont répondu à l'enquête en 2020 et qui sont actuellement propriétaires de leur logement (99 ménages), qui ont une probabilité de 70% de rester ;
4. Les jeunes couples ayant répondu à l'enquête de 2020, qui sont locataires et gagnent entre 30 000 et 60 000 CAD par an (65 ménages), qui ont 66 % de chances de rester dans leur logement actuel ;
5. Les jeunes couples répondant à l'enquête de 2020, vivant en location et gagnant moins de 30 000 CAD ou plus de 60 000 CAD par an (243 ménages) qui ont une probabilité de 53 % de déménager.

Un arbre de décision seul ne permettant pas totalement de déterminer quelles variables ont le plus d'influence sur la volonté de déménager, la fonction rpart fournit le calcul de l'importance de chaque variable. L'importance des variables est présentée dans le Tableau 2-14.

Tableau 2-14 Importance des variables sur la volonté de déménager des ménages autres que "Jeunes couples"

Variable	Jeunes couples	Propriétaire	Année 2020	Revenu entre 30 000 et 60 000 CAD	Nombre de voitures	Proximité à l'emploi	Condominium	Proximité aux garderies	Maison individuelle
Importance	51,5%	15,8%	12,9%	5,9%	5,0%	4,0%	3,0%	1,0%	1,0%

Compte tenu de l'importance du type et de la taille des ménages du groupe des non-"Jeunes couples", il semble approprié d'effectuer une régression par arbre de décision pour ce groupe afin de déterminer quelles variables expliquent la volonté de déménager de ce type de ménages. La base de données utilisée pour cette nouvelle régression est composée de 1754 observations. L'arbre de décision présenté comprend trois divisions, le taux d'erreur relative étant satisfaisant.

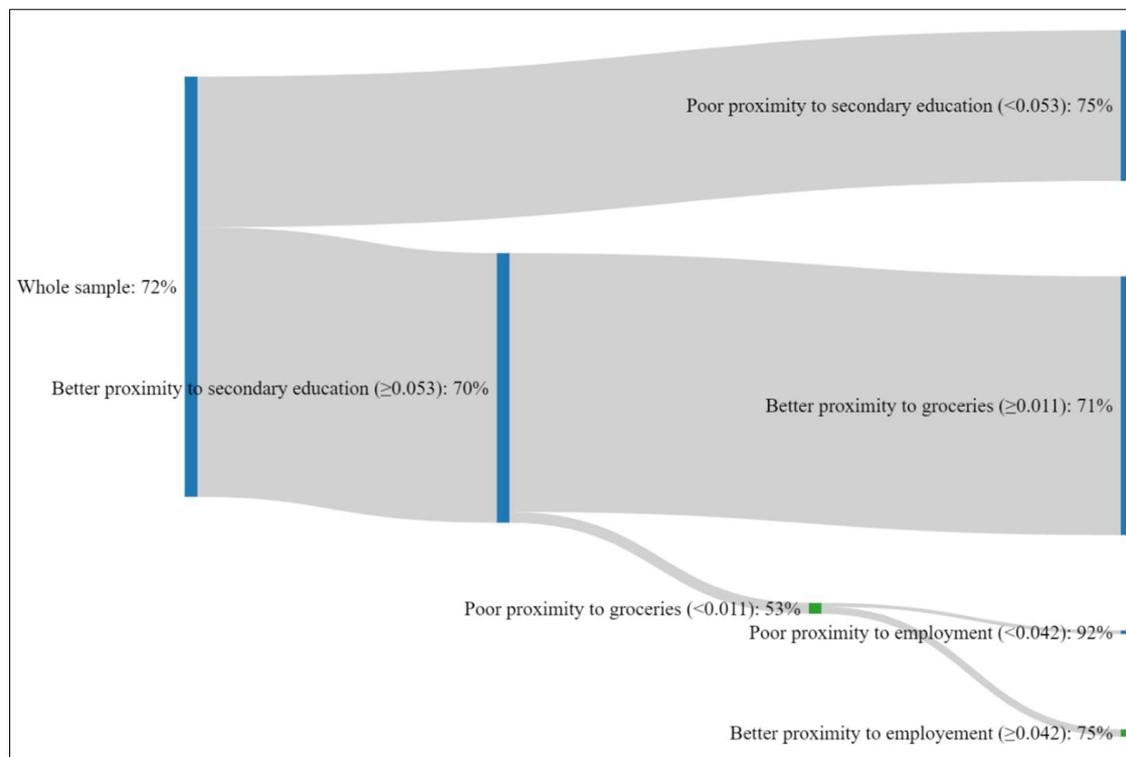


Figure 2-20 Arbre de décision sur la volonté de déménager des ménages autres que les « jeunes couples »

La Figure 2-20 illustre l'arbre de décision sur la volonté de déménager pour ce sous-échantillon. La première variable qui sépare l'échantillon de répondants est la proximité des écoles secondaires. Deux groupes sont formés : les ménages domiciliés dans un secteur de recensement dont l'indice de proximité des écoles secondaires est inférieur à 0,053 et ceux dont la proximité est meilleure. Les ménages ayant la meilleure proximité sont ensuite séparés en deux groupes selon leur proximité des supermarchés. Le groupe ayant une mauvaise proximité des supermarchés (inférieure à 0,011) est ensuite séparé en deux groupes selon la proximité de l'emploi. Cet arbre est donc composé de quatre "feuilles" qui identifient quatre types de ménages:

1. Les ménages situés dans un îlot de diffusion avec une proximité aux écoles secondaires $<0,053$ (503 ménages) qui ont une probabilité de 75% de rester dans leur logement actuel ;
2. Les ménages situés dans un bloc de diffusion avec une proximité aux écoles secondaires $\geq 0,053$ et une proximité de supermarchés $\geq 0,011$ (864 ménages), qui ont une probabilité de 71% de rester dans leur logement actuel ;
3. Les ménages situés dans un bloc de diffusion avec une proximité des écoles secondaires $\geq 0,053$, une proximité des supermarchés $<0,011$, et une proximité de l'emploi $<0,042$ (12 ménages), qui ont une probabilité de 92% de rester dans leur logement actuel ;
4. Les ménages situés dans un bloc de diffusion avec une proximité des écoles secondaires $\geq 0,053$, une proximité des supermarchés $<0,011$, et une proximité de l'emploi $\geq 0,042$ (24 ménages), qui ont une probabilité de 75% de déménager.

Comme la simple observation de l'arbre ne permet pas totalement de déterminer quelles variables ont le plus d'influence sur la volonté de déménager, l'importance des variables est présentée dans le Tableau 2-15.

Tableau 2-15 Importance des variables sur la volonté de déménager pour les ménages autres que les « jeunes couples »

Variable	Proximité à l'emploi	Proximité aux épiceries	Proximité aux écoles secondaires	Proximité aux soins de santé	Proximité au transport en commun	Proximité aux écoles primaires
Importance	34,3%	21,2%	17,2%	11,1%	11,1%	5,1%

Seules les variables de l'environnement résidentiel sont importantes dans la volonté des ménages de déménager. On constate que la proximité à l'emploi est la variable la plus importante. On observe également l'importance de la proximité aux soins de santé, aux écoles primaires et aux transports en commun, variables qui ne sont pas présentes dans l'arbre de décision.

Dans l'enquête, il a été demandé à chaque répondant ayant indiqué qu'il envisageait de déménager de choisir les raisons de cette considération. Les raisons proposées étaient les suivantes : devenir propriétaire, devenir locataire, se rapprocher des amis et de la famille, se rapprocher de la nature, se rapprocher de l'école et des magasins, se rapprocher des transports en commun, se rapprocher du travail, avoir une maison plus grande, avoir un terrain plus grand, limiter les parties communes, réduire les dépenses, réduire les frais de logement, réduire le nombre de pièces, réduire les frais de transport, avoir une maison plus petite et "autre". L'occurrence de la sélection de chacune des réponses énumérées est présentée à la Figure 2-21.

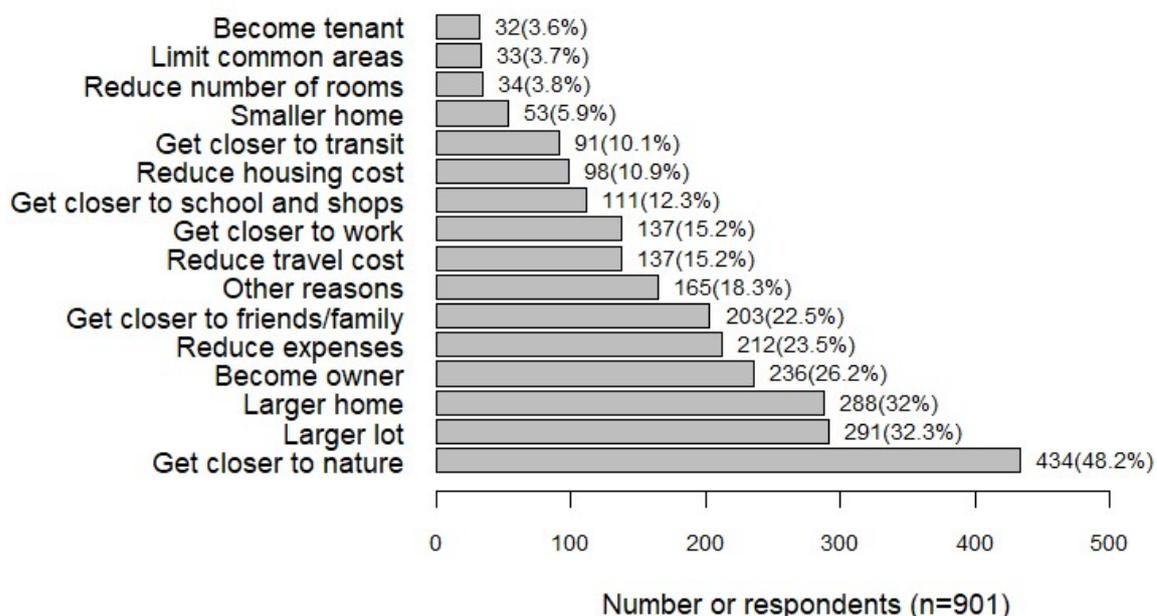


Figure 2-21 Occurrence des raisons motivant la volonté de déménager

La première observation qui découle de l'analyse de la Figure 2-21 est la sélection fréquente des raisons « devenir propriétaire », « avoir une maison plus grande », « avoir un terrain plus grand » et « se rapprocher de la nature ». Ces raisons sont typiques de déménagements vers les périphéries des villes. En effet, la taille des terrains tend à augmenter à mesure que l'on s'éloigne des centre-villes. De plus le prix plus faible des terrains éloignés du centre-ville favorise également l'accession à la propriété. On remarque également une faible sélection des raisons qui pourraient permettre une diminution des dépenses de transport, comme « se rapprocher de l'école et des magasins », « se rapprocher des transports en commun », « se rapprocher du travail » et évidemment « réduire les dépenses de transport ».

Étant donné que près de la moitié de l'échantillon de répondants a sélectionné la raison « se rapprocher de la nature », il semblait intéressant d'étudier les caractéristiques qui différencient les ménages qui ont choisi cette raison de ceux qui ne l'ont pas choisie.

Tableau 2-16 Comparaison des caractéristiques des ménages qui ont choisi ou non la raison « Se rapprocher de la nature »

		A sélectionné « Se rapprocher de la nature » (% de l'échantillon)	N'a pas sélectionné « Se rapprocher de la nature » (% de l'échantillon)
Motorisation du ménage	Motorisé:	69,2	65,3
	Non motorisé	30,8	34,7
Propriétaire	Propriétaire:	49,3	48,2
	Locataire:	50,7	51,8
Type de logement	Condominium:	50,7	48,2
	Plex:	13,6	14,5
	Maison de ville:	6,1	6,5
	Maison jumelée:	7,9	5,9
	Maison individuelle:	20,3	23,9
	Autre:	1,4	1,1
Année	2020 :	61,0	55,1
	2021 :	39,0	44,9
Type de ménage	Soixantaines :	10,3	9,8
	Famille multigénérationnelle :	2,3	1,7
	Jeunes couples :	42,3	44,3
	Adultes et seniors :	1,6	2,2
	Retraités :	0,9	2,6
	Très jeunes familles :	20,6	17,8
	Cinquantaines :	11,0	10,4
	Jeunes familles :	11,0	11,1

Les ménages qui ont choisi "Se rapprocher de la nature" comme l'une des raisons proposées sont globalement plus motorisés que ceux qui n'ont pas choisi cette raison. Une autre différence importante entre ces deux échantillons est la proportion de ménages " Très jeunes familles ", ce type étant plus représenté parmi les ménages considérant la proximité de la nature. À l'inverse, les ménages de type "jeunes couples" accordent moins d'importance à la proximité de la nature que les autres types de ménages dans leur processus de relocalisation. Les ménages vivant dans des condominiums sont plus susceptibles de choisir cette raison que les ménages vivant dans des maisons. Ces observations semblent décrire un type de ménage qui accorde de l'importance à la proximité de la nature : les familles avec enfants, possédant déjà un ou plusieurs véhicules et vivant dans des appartements ou des maisons mitoyennes ne disposant pas, ou moins, d'espace que les ménages vivant dans des maisons individuelles, qui ont généralement de l'espace extérieur. Nous constatons également que les personnes ayant choisi cette raison sont nettement plus nombreuses en 2020 qu'en 2021. Cela pourrait s'expliquer par le fait que le confinement de 2020 était plus restrictif que celui de 2021, et donc que les gens étaient peut-être plus sensibles à la proximité d'espaces ouverts pendant ces périodes d'enfermement strict.

Puisque chaque répondant pouvait choisir un nombre illimité de réponses, il semblait important d'observer le nombre de raisons choisies par chacun. Le nombre de raisons sélectionnées par les répondants dans cette enquête est présenté à la Figure 2-22. Notez qu'un répondant a sélectionné les 16 raisons, mais comme certaines d'entre elles sont contradictoires ("Avoir une maison plus petite" et "Avoir une maison plus grande"), nous avons choisi de retirer cette observation de l'ensemble des données.

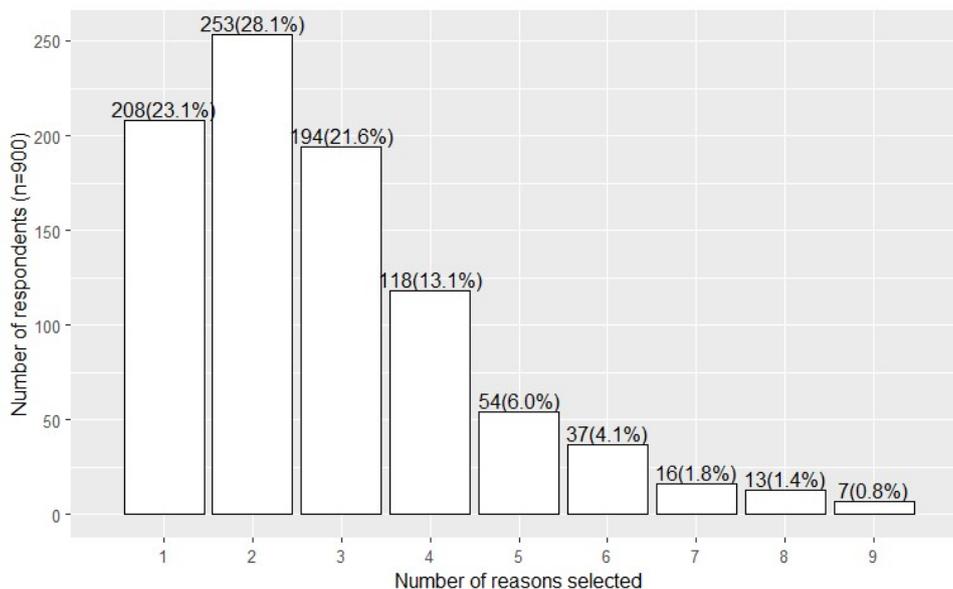


Figure 2-22 Nombre de raisons sélectionnées par les répondants

Le grand nombre de répondants qui ont sélectionné une, deux ou trois réponses nous a permis d'étudier quelles raisons sont souvent sélectionnées ensemble. L'algorithme Apriori nous a permis d'obtenir les résultats présentés dans le Tableau 2-17.

Tableau 2-17 Occurrence de combinaisons de raisons, en fonction du nombre de réponses sélectionnées

Nombre de raisons sélectionnées	Raison ou combinaison de raisons la plus fréquente	Fréquence de réponse
1 (n=208)	Se rapprocher de la nature	28,4% (59)
	Plus grande maison	17,3% (36)
	Devenir propriétaire	14,9% (31)
2 (n=253)	Se rapprocher de la nature & Plus grand terrain	11,9% (30)
	Se rapprocher de la nature & Autres raisons	9,1% (23)
	Maison plus grande & Plus grand terrain	5,9% (15)
3 (n=194)	Se rapprocher de la nature & Plus grand terrain & Plus grande maison	11,3% (22)
	Devenir propriétaire & Plus grand terrain & Plus grande maison	8,2% (16)
	Se rapprocher de la nature & Plus grand terrain & Devenir propriétaire	7,2% (14)

Nous constatons encore que les raisons retenues ensemble sont suggestives des motifs qui caractérisent les déménagements de la ville vers les banlieues.

2.7.5 Conclusion

Avant de tirer toute conclusion des résultats présentés dans ce chapitre, il est important de présenter les limites d'interprétation. La principale limite est le type d'échantillon utilisé. Comme le sondage a été distribué via les réseaux sociaux, il s'agit d'un échantillon opportuniste, et nous ne pouvons pas présumer sans risque que notre échantillon est représentatif de la population du

Grand Montréal et que les résultats sont généralisables. Cependant, nous croyons que les données uniques recueillies pendant cette période de la pandémie, qui a perturbé les habitudes des ménages, nous permettent d'explorer le processus de réflexion lié au choix d'un nouveau lieu de résidence. De plus, il existe une correspondance raisonnable entre l'échantillon et les données de l'enquête sur les déplacements à Montréal. Par conséquent, les résultats de l'échantillon complet sont considérés comme des indications raisonnablement précises des attitudes des ménages dans la région du Grand Montréal. Enfin, les résultats sont conformes aux conclusions d'autres travaux sur le choix du lieu de résidence. Bien que l'étude ait des limites, cela ajoute une crédibilité substantielle aux résultats.

L'analyse des résultats des enquêtes COVID-19 de 2020 et 2021 s'est d'abord portée sur les caractéristiques, le logement et la localisation des ménages ayant exprimé la volonté de déménager et a montré que 1) le type de ménage a une forte influence sur la réflexion sur le déménagement, les jeunes couples ayant une probabilité plus faible de vouloir rester dans leur logement que les autres types de ménages (49% et 71% respectivement) ; 2) la proximité des services dans la zone où vivent les ménages a un impact important sur la volonté de déménager pour tous les types de ménages, à l'exception des jeunes couples, les facteurs influençant ces derniers étant le type de propriété du logement, l'année de réponse à l'enquête et le revenu ; 3) les ménages (autres que les "jeunes couples") vivant dans des zones avec une bonne proximité des écoles secondaires et de l'emploi sont plus susceptibles de vouloir déménager que les ménages avec une moins bonne proximité, tandis qu'une bonne proximité des épiceries favorisera le fait de rester dans le logement actuel. Dans l'ensemble, les résultats de l'arbre de décision sont cohérents avec les taux élevés de volonté de déménager pour les zones municipales plus centrales et densément urbanisées mises en évidence dans la Figure 2-18.

L'étude a ensuite examiné les raisons pour lesquelles les ménages souhaitent déménager. Les conclusions que nous avons pu tirer de notre base de données sont, tout d'abord, que se rapprocher de la nature est la raison la plus courante (48,1%). Les ménages qui ont choisi cette raison parmi celles disponibles sont généralement des familles avec enfants, possédant déjà un ou plusieurs véhicules, et vivant dans des types de logement avec peu ou pas d'espace extérieur. La proximité de la nature est également plus envisagée pendant les périodes de confinement très restrictives. Cette raison s'accompagne souvent du désir d'avoir accès à une maison ou un terrain plus grand et de devenir propriétaire. Ces raisons récurrentes sont assez typiques d'une relocalisation en périphérie des villes, car s'éloigner du centre-ville permet de se rapprocher de la nature et donne la possibilité d'accéder à des maisons plus grandes avec jardin. L'accès à la propriété est également plus facile lorsqu'on s'éloigne du centre-ville. Conformément aux conclusions précédentes, la proximité des services de la vie quotidienne (épiceries, pharmacies) et des zones de déplacements contraints (emplois, écoles) ne sont pas des motifs de déménagement fréquemment évoqués, pas plus que la réduction des dépenses de transport. Cela démontre une certaine ignorance de l'impact des décisions du choix de localisation résidentielle sur la mobilité quotidienne et les dépenses qui en découlent.

2.8 Fardeau du répondant dans les enquêtes web

- Par : Hedieh Keshavarz, maîtrise
- Supervision : Pre Catherine Morency
- Contexte : Chaire Mobilité / Mobilizing Justice
- Date de fin prévue : août 2023

2.8.1 Introduction

Les enquêtes comptent parmi les outils les plus importants pour recueillir des données dans le domaine des comportements de transport et de la mobilité. Des entretiens en face à face aux versions papier et crayon, les sondages en ligne sont devenus de plus en plus populaires avec les progrès des technologies Web. Les données recueillies à partir d'enquêtes sont l'une des méthodes traditionnelles utilisées pour étudier les comportements de mobilité dans le domaine des transports (Zhang, Wang et al. 2011, Qureshi et Abdullah 2013). Une enquête peut fournir des données qui seront utiles à la planification urbaine, au développement du transport en commun, à l'amélioration des infrastructures de transport actif et à l'élaboration de politiques, ainsi qu'aux interventions menées par les organisations responsables. Il est donc important de recueillir des données exactes et non biaisées à l'aide d'enquêtes.

Les enquêtes menées en ligne deviennent de plus en plus populaires en raison de leur faible coût et de leur gain de temps, ainsi que de leur capacité à atteindre un public plus large, y compris ceux qui sont difficiles à atteindre par d'autres modes (Saleh et Bista 2017).

Alors que les enquêtes en ligne sont rentables et rapides, les interruptions et les faibles taux de réponse deviennent de plus en plus fréquents (Dykema, Jones et al. 2013). Par conséquent, il est essentiel d'identifier les facteurs qui poussent les répondants à abandonner les enquêtes et de déterminer comment ces facteurs peuvent être modifiés afin de maximiser le taux de réponse. Plus précisément, Crawford, Couper et al. (2001) soutiennent que les internautes deviennent impatients et moins susceptibles de répondre aux sondages en raison du lourd fardeau des interactions sur le Web. C'est à ce moment que le concept de fardeau du répondant peut être introduit.

Le fardeau du répondant est défini de différentes façons dans les études précédentes. Frankel (1980) a défini le fardeau du répondant comme « les facteurs associés à la présence de sentiments négatifs tels que l'agacement, la frustration ou les inconvénients qui peuvent être ressentis par les participants à l'enquête ». Selon Sharp et Frankel (1983), le fardeau du répondant est défini comme « les difficultés présumées entraînées par le fait d'être un participant à l'enquête ». Lavrakas (2008) a défini le fardeau comme suit : « le degré selon lequel un répondant à une enquête perçoit la participation à un projet de recherche par sondage comme difficile, chronophage ou émotionnellement stressant est appelé fardeau du répondant ». Et selon Briz-Redón (2021), "the respondent burden refers to the effort required by a respondent to answer a questionnaire".

Hoogendoorn (2004) a distingué le fardeau réel du fardeau perçu. Des mesures objectives de la complexité de l'enquête, comme le nombre et la longueur des questions et la fréquence des entretiens, peuvent aider à déterminer le fardeau réel (Bradburn 1978, Hoogendoorn 2004, Yan, Fricker et al. 2014, Bottone, Modugno et al. 2021). Alternativement, le fardeau subjectif fait référence aux perceptions des répondants du fardeau associé à l'accomplissement d'une tâche d'enquête. Cela peut être capturé en interrogeant directement les répondants sur leurs perceptions du fardeau au moyen de questions post-enquête. Dans certains cas, des groupes

cibles peuvent être définis afin que les caractéristiques de l'enquête et des tâches puissent être étudiées auprès d'un plus petit groupe de répondants.

Yan, Fricker et al. (2020) ont conclu que le fardeau pouvait être mesuré selon trois approches. Dans la première approche, les paramètres objectifs de l'enquête sont évalués, tels que la longueur de l'enquête, mesurée par le nombre de pages, les éléments de l'enquête ou le temps nécessaire pour le compléter (Singer, Van Hoewyk et al. 1999, Groves, Presser et al. 2004, Hoogendoorn 2004, Bergman et Brage 2008, Giesen 2012). Une deuxième approche a examiné les attitudes des répondants concernant l'utilité et l'intérêt de l'enquête. Cette approche mesurerait le fardeau non pas de manière directe mais comme un médiateur du fardeau perçue. La troisième approche évalue le fardeau en fonction de résultats indésirables, tels que le refus de participer à de futures enquêtes et les abandons (Stocké et Langfeldt, 2004).

Par conséquent, la meilleure façon de définir le fardeau est un concept multidimensionnel qui tient compte des caractéristiques des répondants, des caractéristiques de l'enquête et de leurs interactions avec le contenu de l'enquête. Il est essentiel de comprendre l'ampleur des différents facteurs qui contribuent au fardeau du répondant et d'élaborer des mesures pour quantifier ces facteurs afin d'améliorer la qualité des données et de réduire les interruptions. Cette section traite des méthodes utilisées pour analyser et mesurer le fardeau dans des études antérieures.

2.8.2 Revue de littérature

2.8.2.1 Facteurs effectifs du fardeau du répondant

Divers facteurs contribuent au fardeau du répondant et peuvent être classés en trois catégories : ceux associés au questionnaire, ceux associés aux répondants et ceux associés à l'interaction du répondant avec la tâche d'enquête.

Parmi les facteurs associés au questionnaire, Revilla (2017) a noté que le format de la question est un facteur important affectant les taux de participation aux sondages en ligne. L'étude a révélé que le format de grille, les questions ouvertes et les questions à réponses multiples avec plusieurs options sont plus contraignants. Une suggestion faite par Smyth, Dillman et al. (2006) était d'éviter les questions à réponses multiples et de demander aux répondants de répondre par oui ou par non à chaque élément d'une enquête en ligne. Une étude de Krosnick et Berent (1993) sur différentes enquêtes indique que l'interface graphique est l'un des facteurs les plus importants affectant le fardeau lors d'enquêtes en ligne. Une étude de Chung, Srikukenthiran et al. (2021) a montré que l'utilisation d'une interface attrayante augmente la probabilité de répondre à un sondage en ligne. Rudžionienė, Grigas et al. (2018) ont affirmé que les enquêtes adaptées aux téléphones et aux tablettes sont plus puissantes pour maintenir l'intérêt des répondants. Par ailleurs, les travaux de Bourbonnais et Morency (2018) indiquent que remplir un sondage sur petit écran entraîne un sondage plus long, donc un fardeau plus grand.

Dans des études antérieures, il a été constaté que le parrainage de l'enquête et la réputation du fournisseur de l'enquête influençaient les taux de réponse. Dans des études comparant les enquêtes parrainées par le gouvernement et les universités à celles d'autres sources, Walston, Lissitz et al. (2006) et Fang, Wen et al. (2012) ont constaté que les anciennes enquêtes avaient des taux de participation plus élevés.

L'âge, le sexe, la taille du ménage et le niveau d'éducation se sont avérés être des facteurs importants dans le taux d'achèvement de l'enquête associés aux caractéristiques des répondants. Bourbonnais et Morency (2018) soutiennent que les répondants plus âgés et ceux qui ont un faible

niveau d'éducation auront besoin de plus de temps pour répondre aux sondages. Keusch (2015) a constaté que les femmes participent plus souvent aux sondages en ligne que les hommes.

Enfin, parmi les facteurs associés au questionnaire et à son interaction avec les répondants, le temps de réponse au questionnaire est considéré comme l'un des facteurs les plus influents sur le fardeau de réponse. Les chercheurs ont conclu que plus une enquête prend de temps à être complétée, plus elle sera lourde, ce qui entraînera un taux d'abandon plus élevé (Yan, Conrad et al. 2010, Göritz 2014, Revilla et Ochoa 2017, Rudžionienė, Grigas et al. 2018).

Plusieurs auteurs (Groves, Presser et al. 2004, Zillmann, Schmitz et al. 2014, Rudžionienė, Grigas et al. 2018) ont constaté que la participation à l'enquête est considérablement affectée par l'intérêt pour le sujet de l'enquête, que ce soit dans les enquêtes téléphoniques ou en ligne. Une étude de Sakshaug, Vicari et al. (2019) a montré l'effet du mode de contact sur le taux de réponse. Selon leur étude, les invitations papier et les rappels papier entraînent un taux de réponse plus élevé et moins d'éléments de non-réponse dans une enquête en ligne. Selon une étude de Rudžionienė, Grigas et al. (2018), la personnalisation des invitations peut également inciter les répondants à participer davantage à une enquête en ligne. Schmid et Axhausen (2019) ont constaté que les incitations monétaires étaient efficaces pour encourager la participation à l'enquête par retour par la poste et réduire le fardeau de réponse. Selon Bottone, Modugno et al. (2021), le fardeau du répondant sera affecté négativement par la complexité cognitive de la tâche et la fréquence de l'enquête. Les attitudes des répondants envers les enquêtes, telles que le plaisir et la valeur perçue, se sont révélées être liées à un taux de réponse plus élevé (Krosnick et Berent 1993, Rogelberg, Luong et al. 2000).

2.8.2.2 Analyse et modélisation du fardeau de réponse

L'objectif de cette section est d'examiner divers modèles qui ont été élaborés pour mesurer le fardeau de réponse, qu'il soit considéré comme une variable dépendante ou comme une variable prédictive.

Bradburn (1978) a décrit quatre facteurs qui contribuent au fardeau : la durée de l'enquête, l'effort des répondants, la fréquence des entrevues et le stress et l'inconfort des répondants pendant l'entrevue (Figure 2-23). Dans ce travail, la dimension psychologique du fardeau de réponse, l'effort et le stress impliqués dans la réponse à une enquête, a été examinée pour la première fois. Bradburn croyait que la durée de l'enquête ne peut à elle seule définir le taux d'achèvement et que c'est la corrélation entre la durée de l'entrevue et l'effort requis pour répondre à une enquête qui définit le fardeau. Par exemple, un questionnaire ennuyeux peut prendre plus de temps à remplir qu'un questionnaire long mais intéressant. Bradburn n'a pas exploré la contribution de ces éléments au fardeau de réponse à l'aide de modèles.

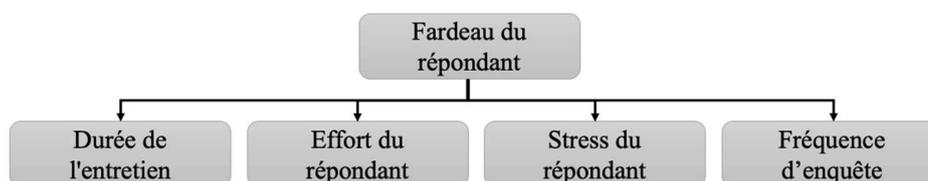


Figure 2-23. Facteurs associés du fardeau du répondants (Bradburn 1978)

Fisher et Kydonieffs (2001) ont proposé un modèle théorique du fardeau de réponse. Il y a 32 éléments qui affectent le fardeau de réponse dans ce modèle et ils sont regroupés en 3 catégories: fardeau de réponse, fardeau lié à la conception de l'enquête et fardeau d'interaction,

complètement distingués les uns des autres (Figure 2-24). Le fardeau du répondant concerne uniquement les attitudes des répondants, quel que soit le plan d'enquête. Le fardeau conçu implique la façon dont l'enquête est construite, la façon dont son contenu est présenté et la façon dont les données sont collectées, tandis que le fardeau d'interaction implique l'interaction entre les répondants et l'enquête.

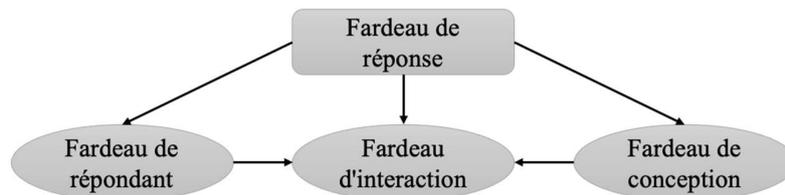


Figure 2-24. La relation entre le fardeau de réponse et les éléments efficaces (Fisher et Kydoniefs 2001)

L'étude de Haraldsen (2004) a conclu qu'il devrait y avoir une distinction entre les éléments causant un fardeau et ceux qui contribuent à un sentiment de fardeau. En outre, les éléments liés à la qualité des données ne doivent pas être confondus avec ceux qui contribuent au fardeau du répondant. La Figure 2-25 illustre comment la conception de l'enquête, le fardeau de réponse et la qualité des réponses sont liés. Selon ce modèle, les propriétés de l'enquête sont expliquées par quatre aspects du questionnaire lui-même, trois aspects de la procédure d'enquête et quatre aspects de la procédure de collecte de données et de la boîte à outils de l'enquête en ligne. En termes de caractéristiques des répondants, la disponibilité, l'intérêt et la compétence des répondants ont été pris en compte (Haraldsen 2004).

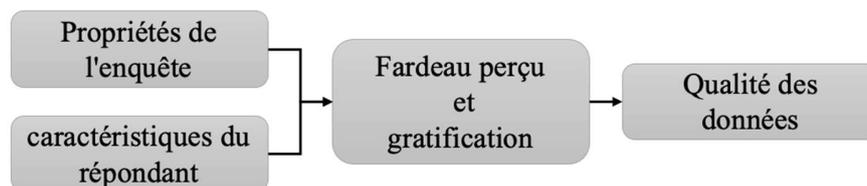


Figure 2-25. L'interaction entre le répondant et l'enquête menant au fardeau de réponse et à la gratification, reproduite de (Haraldsen 2004)

Une analyse par Fricker et Yan (2014) de l'enquête trimestrielle sur les dépenses des clients (en face à face) a montré que les perceptions subjectives de la tâche d'enquête affectaient directement le fardeau. La modélisation par équation structurelle (SEM) a été développée pour étudier comment la motivation des répondants, la difficulté de la tâche, l'effort de recrutement, la perception du contenu de l'enquête et la perception de la tâche de l'enquête peuvent affecter le fardeau de réponse en tant que concept subjectif. Le fardeau en tant que variable de réponse a été mesuré au moyen d'une question post-enquête demandant à quel point l'enquête était lourde selon la perception du répondant et les prédicteurs étaient tous des concepts latents (Fricker, Yan et al. 2014). Certains de ces indicateurs ont été mesurés par des notes prises par les enquêteurs, certains par l'auto-perception des répondants, et certains étaient des mesures objectives.

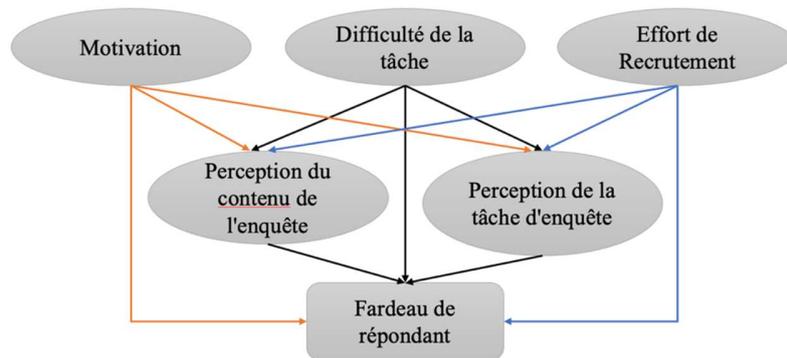


Figure 2-26. Modèle structurel du fardeau du répondant, reproduit de (Fricker, Yan et al. 2014)

Dans une autre étude, Fricker et al. (2012) a appliqué la modélisation des moindres carrés partiels (PLS) pour mesurer le fardeau. Les données associées aux variables prédictives ont été recueillies par un ensemble de questions post-enquête, y compris la perception des répondants du fardeau, de la longueur, de la difficulté, de l'intérêt et de la fréquence de l'enquête. Les données ont ensuite servi d'indicateurs de quatre construits latents utilisés dans le modèle. La perception de la longueur de l'enquête (PL), la perception de l'effort (PE) et la perception de la fréquence des demandes d'entretien (PF) ont été mises en œuvre dans le modèle PLS pour contribuer au fardeau perçu (PB). La Figure 2-27 montre leur impact et leur importance dans la formation du fardeau du répondant (Fricker, Kreisler et al. 2012).

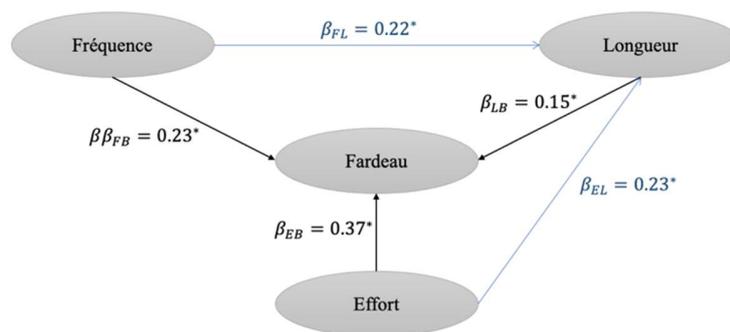


Figure 2-27. Modèle de trajectoire PLS du fardeau reproduit à partir de Fricker, Kreisler et al. (2012)

Une autre étude menée par Schmid et Axhausen (2019) sur un ensemble d'enquêtes par courrier visait à analyser les effets du fardeau de réponse, des incitations monétaires et des niveaux de recrutement des répondants sur le taux de réponse. En fonction du type et de la complexité des questions, les scores de fardeau ont été calculés (Tableau 2-18) sans tenir compte de la perception du fardeau. Un modèle de régression logistique a ensuite été utilisé pour prédire le taux de réponse, entraînant une baisse du taux de réponse de 6 % pour chaque tranche de 100 augmentations de l'indice du fardeau de réponse.

Tableau 2-18. Point de fardeau basé sur le type et la complexité des questions, reproduit de (Schmid et Axhausen 2019)

Élément d'enquête	Point de fardeau
Question ou transition (jusqu'à 3 lignes)	2
Chaque ligne supplémentaire	1
Réponses fermées oui/non	1
Réponse numérique simple (par exemple, année de naissance)	1
Classement avec jusqu'à 5 possibilités	2
Classement avec plus de 5 possibilités	3
Classement gauche, milieu, droite	2
Échelles avec 3 notes et plus	2
Meilleur classement avec cartes	4
Deuxième et chaque meilleur classement supplémentaire	3
Réponse aux sous-questions de 5 mots maximum	1
Réponses à la sous-question jusqu'à 2 lignes	2
a) Réponse à une question semi-ouverte avec ≤ 8 possibilités	2
Chaque supplémentaire	2
b) Réponse à une question semi-ouverte avec ≥ 8 possibilités	4
Chaque supplémentaire	3
Réponse à "veuillez préciser"	2
Première réponse à une question ouverte	6
Chaque réponse supplémentaire à la question ouverte	3
Cartes de mixage	6
Donner/montrer une carte au répondant	1
Par catégorie de réponse sur une carte de présentation	1
Filtre	0.5
Ramification	0.5
Pour chaque question à choix énoncé avec 2 alternatives	2
Pour chaque question à choix énoncé avec 3 alternatives	3
Pour chaque variable de la situation de choix énoncée et chaque question	1

Le SEM a été utilisé dans la dernière étude de Yan et Fricker (2020) pour étudier les facteurs liés au fardeau de l'enquête, y compris les caractéristiques de l'enquête, les caractéristiques des répondants et la perception de la tâche par les répondants. Les chercheurs ont constaté que la motivation, les attitudes envers la difficulté de la tâche et la perception subjective influencent de manière significative le fardeau. Une analyse multi-groupes (MGA) a été menée dans cette étude afin d'explorer si le même modèle de fardeau pouvait être appliqué à différents modes d'enquête

tels que les entretiens téléphoniques et les résultats étaient prometteurs dans ce contexte (Yan, Fricker et al. 2020).

Tirant les leçons de travaux antérieurs, mes recherches en 2022 ont été associées à l'analyse et à la modélisation du fardeau des répondants dans une enquête en ligne liée au comportement de mobilité des résidents du Québec à l'ère de la COVID.

2.8.3 Données

2.8.3.1 Questions sociodémographiques et liées à la COVID

Les données de cette analyse ont été recueillies à partir d'un questionnaire en ligne évaluant le comportement de mobilité des résidents du Québec avant, pendant et après la pandémie de COVID-19. Un questionnaire bilingue a été envoyé aux répondants par courriel, suivi d'annonces sur les réseaux sociaux sur des plateformes telles que LinkedIn. Il y avait un échantillonnage opportuniste de la population cible, qui était âgée de 17 à 87 ans.

La première partie de l'enquête est composée de questions concernant des informations sur les éléments factuels et les caractéristiques sociodémographiques des répondants. Il y a un certain nombre de facteurs à considérer, tels que l'âge, le sexe, l'adresse de la maison, le niveau d'éducation, la taille du ménage, la possession d'une voiture et l'occupation principale.

La deuxième section de l'enquête portait sur les endroits habituels que les gens visitaient avant la COVID, les modes de transport qu'ils utilisaient et comment leur comportement a changé pendant et après (comportements projetés) la pandémie. Les sections suivantes de l'enquête comprenaient des questions comportementales concernant le télétravail et les achats en ligne et la façon dont ces attitudes ont changé pendant la COVID.

Différents types de questions ont été incluses dans l'enquête, y compris oui/non, réponse courte, choix multiples, échelle de Likert et sélection à partir d'une carte (par exemple, pour l'adresse du domicile et les lieux fréquemment visités). Toutes les questions de l'échelle de Likert ont été codées sous forme de curseurs qui ont collecté des données continues entre 0 et 100.

2.8.3.2 Questions liées au fardeau

L'enquête se termine par sept questions post-enquête pour capturer l'auto-perception des répondants de la tâche d'enquête. Les questions ont été conçues pour saisir la perception des participants concernant la difficulté, la durée, la lourdeur, l'intérêt de l'enquête (Fricker, Kreisler et al. 2012), la volonté de participer à de nouvelles enquêtes et la propension à abandonner l'enquête. La Figure 2-28 montre une capture d'écran de l'interface utilisateur et de la conception de la question. À l'aide de curseurs sur une échelle de 0 à 100, des données concernant le fardeau, l'intérêt, la difficulté et l'évaluation de la durée ont été recueillies. On a demandé si les répondants seraient disposés à participer à de nouvelles enquêtes et s'ils seraient enclins à abandonner l'enquête sous forme de questions Oui/Non. Afin de recueillir le temps perçu, une variable continue a été utilisée pour indiquer combien de temps les répondants pensaient qu'il leur fallait pour répondre à l'enquête. Les journaux d'administration de l'enquête fournissent des informations sur le temps réel pris pour répondre à l'enquête par chaque répondant.

Figure 2-28 shows a survey interface with the following questions and controls:

- Question 1: "Seriez-vous intéressés à participer à d'autres études menées par la Chaire Mobilité de Polytechnique Montréal?" with radio buttons for "Oui" and "Non".
- Question 2: "Pensez-vous que le questionnaire était trop court, correct ou trop long?" with a slider ranging from "Trop court" to "Trop long", with "Correct" in the middle.
- Question 3: "Combien de temps pensez-vous avoir passé à répondre à ce questionnaire (en minutes)?" with a text input field.
- Question 4: "Dans quelle mesure cette enquête a-t-elle été intéressante pour vous?" with a slider ranging from "Pas du tout" to "Très intéressante".
- Question 5: "Dans quelle mesure vous a-t-il été difficile ou facile de répondre aux questions de cette enquête?" with a slider ranging from "Très facile" to "Très difficile".
- Question 6: "À quel point cette enquête vous a-t-elle été pénible?" with a slider ranging from "Pas du tout" to "Très pénible".
- Question 7: "Avez-vous été tenté, à un certain point, d'abandonner l'enquête?" with radio buttons for "Oui" and "Non".

Figure 2-28. Interface graphique de l'outil d'enquête et conception des questions d'enquête

2.8.3.3 Statistiques descriptives

Le Tableau 2-19 présente des statistiques descriptives des variables mesurées associées aux questions post-enquête.

Tableau 2-19. Statistiques descriptives des variables mesurées

n=1507	Mean	Std	min	max
Fardeau	28.37	21.81	0	100
Difficulté	27.18	21.94	0	100
Intérêt	56.71	22.97	0	100
Évaluation de la durée	61.29	16.36	2	100
Temps perçu (min)	14.14	6.84	1	60
Temps réel (min)	21.1	9.77	5.75	59.83
Tendance à abandonner	Oui = 501 Non = 1006			
Volonté de participer à une nouvelle enquête	Oui = 1070 Non = 437			
Genre	Homme = 683 femme = 824			
Group d'âge	Jeune(<35) = 266 âge moyen (35-55) = 731 personnes âgées(> 55) = 510			
Niveau de scolarité	non_universitaire= 365 universitaire = 1142			
Plateforme	petit écran = 439 grand écran = 1068			

En considérant les statistiques descriptives de ces variables, nous découvrons que la valeur moyenne du temps perçu est de 14,14 minutes, ce qui est remarquablement inférieur à 21,12 minutes pour le temps mesuré réel. En divisant ces deux valeurs, le rapport de temps a été calculé, et deux catégories : moins perçu (la durée perçue est moindre que la durée réelle) et plus perçu (la durée perçue est supérieure à la durée réelle) ont été créées. La Figure 2-30 montre que 84 % des répondants ont déclaré un temps perçu inférieur au temps réel.

Dans la Figure 2-29, la représentation de la distribution des variables observées et calculées montre la même tendance de distribution pour le fardeau et la difficulté. Une distribution normale d'intérêt peut être observée avec des niveaux d'intérêt moyens représentés par le pic. Dans l'évaluation de la durée de l'enquête, le graphique montre que plus de personnes indiquent que la durée de l'enquête était à peu près correcte, plutôt que d'être courte ou longue. De plus, la distribution des données sur les temps perçu et mesuré montre la même tendance avec une population plus élevée percevant que l'enquête soit aussi inférieure à 20 minutes.

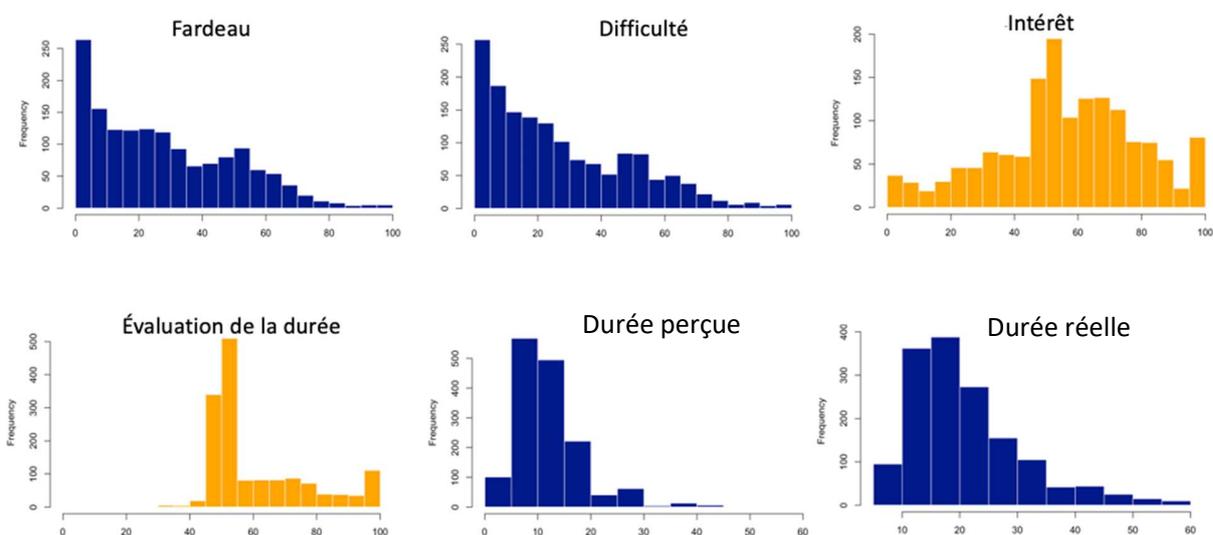


Figure 2-29. Distribution des variables mesurées

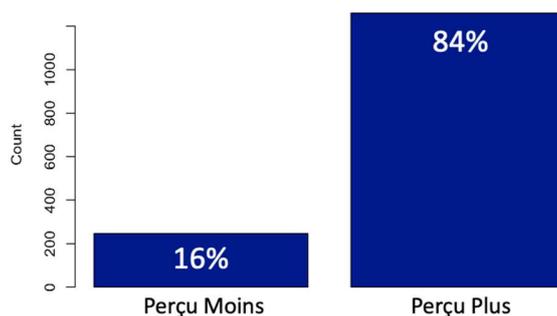


Figure 2-30. Perception du temps

La corrélation entre les variables est présentée au Tableau 2-20. La corrélation de Pearson est utilisée entre les variables continues, la corrélation bisérielle ponctuelle est utilisée pour calculer la corrélation entre les variables continues et binaires, et la corrélation polychorique est utilisée pour deux variables binaires. Il est évident que le fardeau, la difficulté et la volonté d'abandonner

l'enquête ont une corrélation positive relativement élevée. Intérêt et fardeau sont corrélés négativement et relativement importante. La durée et le fardeau perçus sont moins corrélés que l'évaluation de la durée et le fardeau, ainsi la perception de durée est plus pertinente pour la compréhension du fardeau. Une faible corrélation entre le fardeau et le temps mesuré indique que le temps mesuré n'explique pas une grande partie de la variation du fardeau.

Tableau 2-20. Matrice de corrélation entre les variables

	Fardeau	Intérêt	Évaluation	Difficulté	T.perçu	T.mesuré	abandonn	Volonté
Le Fardeau	1							
L'Intérêt	-0.41	1						
Évaluation de la durée	0.5	-0.26	1					
Le Difficulté	0.42	-0.2	0.23	1				
Temps perçu	0.18	-0.01	0.24	0.14	1			
Temps mesuré	0.03	0.03	0.09	0.12	0.55	1		
Tendance à abandonner	0.43	-0.29	0.4	0.28	0.12	0.11	1	
Volonté a nouvelle enquête	-0.25	0.34	-0.23	-0.1	0	0.03	-0.32	1

2.8.4 Développement d'un modèle

La modélisation par équation structurelle (SEM) est utilisée pour étudier la relation entre les variables dans cette étude. Le but d'un modèle par SEM est de fournir un cadre analytique pour modéliser des relations complexes entre des variables observées et non observées, ainsi qu'entre plusieurs constructions non observées. Les variables observées sont mesurées directement ou extraites d'enquêtes. Les variables qui ne sont pas observées, également appelées variables/facteurs latents ou construits, sont définies conceptuellement parce qu'elles sont relativement complexes et doivent être évaluées avec plusieurs évaluations. Un modèle SEM vise à expliquer la covariance entre les variables observées et construit une matrice de covariance de l'échantillon observé qui sera ensuite comparée à la matrice de covariance estimée pour voir dans quelle mesure le modèle explique les données. Le SEM est composé de deux composants principaux : un modèle de mesure qui spécifie la relation entre les variables latentes et les variables mesurées, et un modèle structurel qui spécifie la relation entre les constructions latentes.

L'analyse factorielle confirmatoire (AFC) a été effectuée avant le développement du modèle structurel pour vérifier la sélection des facteurs et la structure factorielle sur la base d'études antérieures. L'analyse est effectuée dans le logiciel R à l'aide du package lavaan.

2.8.4.1 Analyse factorielle confirmatoire (CFA)

Statistiquement, la CFA est une approche multivariée utilisée pour tester si une théorie de mesure décrit correctement les relations entre les variables observées et les constructions latentes. Le modèle de mesure a été développé sur la base des résultats de la littérature théorique et des enseignements tirés des travaux antérieurs. À l'aide d'indices de modification dérivés des différences de qualité d'ajustement du chi carré entre le modèle actuel et le modèle modifié, le modèle a été amélioré en modifiant les chemins entre les variables de mesure. À la fin du processus, nous avons construit un modèle de mesure réflexif, qui prédit que la variation des indicateurs observés provient de construits latents. En d'autres termes, les constructions latentes provoquent les variables mesurées et les termes d'erreur indiquent qu'ils ne peuvent pas les expliquer complètement.

Étant donné que la formation du fardeau est l'objectif principal de cette étude, le fardeau a été considéré comme une seule variable de résultat mesurée de façon continue dans le modèle structurel. Au cours du développement du modèle, nous avons tenu compte de la théorie, néanmoins, pour les variables qui n'avaient pas été étudiées dans les travaux précédents (volonté de participer à de nouvelles enquêtes et tendance à abandonner l'enquête), nous avons dû développer et valider de nouveaux construits. Les contraintes suivantes ont contribué à l'articulation de la CFA.

- Mesure de la durée perçue

Le concept de durée perçue (LP) est capturé par deux questions, à savoir « évaluation de la durée de l'enquête » et « temps perçu pour terminer l'enquête ».

- Mesure de l'effort perçu

Le facteur d'effort perçu (EP) a été défini comme étant associé à la « tendance à abandonner l'enquête » et à la « difficulté perçue ».

- Mesure de l'intérêt perçu

Le concept d'intérêt perçu (IP) a été défini pour expliquer la variance de deux variables observées, "l'intérêt pour l'enquête" et "la volonté de participer aux nouvelles enquêtes". Dans le Tableau 2-21, les construits latents sont résumés avec les questions associées, qui servent de variables observées.

Tableau 2-21. Construits latents et leurs indicateurs

Variable latent	Question	Abréviation
Durée perçue (LP)	Pensez-vous que le questionnaire était trop court, correct, ou trop long?	Évaluation de la durée
	Combien de temps pensez-vous avoir passé à répondre à ce questionnaire (en minutes)?	Durée perçue
Effort perçu (EP)	Dans quelle mesure vous a-t-il été difficile ou facile de répondre aux questions de cette enquête?	Difficulté
	Avez-vous été tenté, à un certain point, d'abandonner l'enquête?	Tendance à abandonner
Intérêt perçu (IP)	Dans quelle mesure cette enquête était intéressante pour vous?	Intérêt
	Seriez-vous intéressés à participer à d'autres études menées par la Chaire Mobilité de Polytechnique Montréal?	Volonté de participer aux nouvelles enquêtes

Dans le développement de modèles de mesure, il n'y a pas de chargement croisé (cross-loading) (une variable observée influe sur plusieurs constructions), aucune corrélation d'erreur intra-construction et aucune corrélation d'erreur entre constructions n'est hypothétique. Cependant, en raison de l'indisponibilité des données, la règle des trois éléments n'a pas été respectée lors de la construction de chaque construction.

Pour fixer l'échelle des facteurs latents, nous avons fixé la valeur de la variance des construits latents à 1 et laissé les facteurs de fardeau être librement estimés (Hair et Babin 2018).

Le laavaan utilise le maximum de vraisemblance comme estimateur par défaut. Cependant, compte tenu de la nature binaire de deux questions, les moindres carrés pondérés en diagonale (DWLS), basés sur des matrices de corrélation polychroniques, ont été utilisés pour effectuer l'AFC (Xia et Yang 2019). Le diagramme de chemin pour le modèle de mesure basé sur les facteurs latents et le chargement des facteurs (factor loading) pour chaque manifeste est illustré à la Figure 2-31.

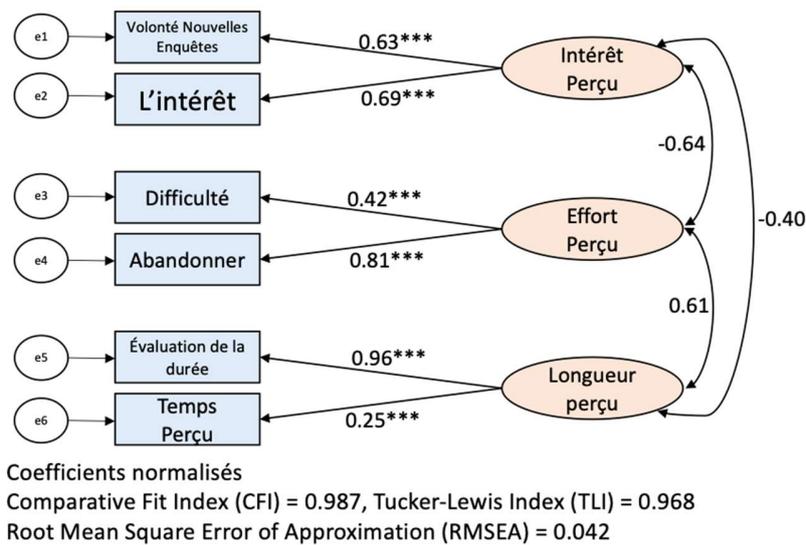


Figure 2-31. Une solution à trois facteurs, un diagramme de cheminement de la spécification du modèle de mesure (modèle CFA)

La majeure partie de cette analyse était basée sur des questions post-enquête portant sur le fardeau, ce qui ne nous a pas permis de poser de nombreuses questions aux répondants qui se sentaient déjà accablés. De ce fait, nous n'avons pas pu mesurer un grand nombre d'indicateurs, et nous avons dû définir les facteurs latents avec seulement deux questions au lieu des trois habituels et plus. Il est donc sous-entendu que chacun de ces construits bidimensionnels est sous-identifié. Nous admettons qu'il s'agit là d'une limite de cette recherche, malgré le fait que l'intégration de ces construits dans un modèle aboutit à ce que le modèle soit suffisamment identifié.

2.8.4.2 Validité d'ajustement

Pour évaluer la validité du modèle de mesure, les statistiques de qualité de l'ajustement doivent être examinées. Tout d'abord, la statique du Chi-carré (= 22,032) a été examinée. Une valeur de p inférieure à 0,005 entraîne le rejet de l'hypothèse nulle selon laquelle SEM n'est pas souhaitable. Les résultats de la valeur p peuvent être biaisés puisque χ^2 statique est très sensible aux tailles d'échantillon plus élevées. Pour résoudre le problème, différentes métriques d'indices d'ajustement approximatifs, tels que les indices d'ajustement absolus et incrémentiels, ont été étudiées. L'indice d'ajustement comparatif standard (CFI) et l'indice Tucker-Lewis (TLI) se sont avérés égaux à 0,987 et 0,968, respectivement. Selon Hu et Bentler (1999) ainsi que (Sarmiento et Costa (2019), lorsque ces valeurs sont supérieures à 0,95, cela indique un très bon ajustement. L'erreur quadratique moyenne d'approximation (RMSEA) s'est avérée appropriée dans des contextes de confirmation parmi les indices d'ajustement absolus (Rigdon 1996). Avec un RMSEA de 0,042, inférieur à 0,06, un bon ajustement a été identifié (Hu et Bentler 1999).

Évaluation de la fiabilité et de la validité du modèle

Des résultats statistiquement significatifs ont été trouvés pour toutes les estimations avec des valeurs de p inférieures à 0,001. Parmi 6 facteurs de fardeau, quatre avaient des valeurs supérieures à 0,6 ce qui selon Malhotra, Kim et al. (2006) ainsi que Hair (2010) est considéré comme acceptable. Parmi les autres, un facteur de fardeau estimé était égal à 0,42 et un égal à 0,25. (Nunnally 1978, Mehdizadeh, Shariat-Mohaymany et al. 2018) ont retenu les items avec des saturations factorielles supérieures à 0,4. Après ce seuil, l'indicateur de difficulté a été conservé dans le modèle. Enfin, le plus petit fardeau factoriel, qui était associé au temps perçu, a été conservé dans le modèle puisque son effet sur le fardeau était pertinent pour la recherche.

Comme mesure de fiabilité, la fiabilité de construction (CR) a été utilisée (Raykov 1997). L'indicateur examine si toutes les manifestations mesurent le même construit et sont fortement corrélées. Une valeur CR entre 0,6 et 0,7 dénote l'existence d'une cohérence interne (Shrestha 2021). D'après le tableau 5, seul IP (intérêt perçu) n'a pas réussi à satisfaire le seuil CR.

En tant que troisième indicateur de validité convergente, la variance moyenne extraite (AVE) est calculée comme la variance moyenne extraite de tous les éléments chargés sur une construction. Les valeurs AVE égales ou supérieures à 0,5 indiquent une convergence adéquate. Le Tableau 2-22 montre que la validité convergente a été atteinte pour les deux variables latentes : EP (effort perçu) et LP (longueur perçue). IP, cependant, n'a pas fourni une assurance complète de la validité convergente.

À l'étape suivante, la validité discriminante (validité divergente) est étudiée. En utilisant la validité discriminante, nous pouvons déterminer si un indicateur mesure un construit mais pas un autre. Le critère de Fornell-Larcker (Fornell et Larcker 1981) stipule que la validité discriminante est satisfaite lorsque la racine carrée de l'AVE de chaque variable latente dépasse sa valeur de corrélation. La construction PI-PE est sujette à controverse, mais comme la différence est petite ($=0,004$), elle peut être ignorée (Rahim et Magner 1995). Nous pouvons donc dire que la validité discriminante a été pleinement satisfaite pour tous les construits.

Tableau 2-22. Validité et fiabilité du modèle de mesure, racine carrée de l'AVE en gras et corrélation entre les construits en hors diagonal

Variable Latent	Fiabilité et validité convergente		Validité discriminante		
	Composite reliability (CR)	Average Variance Extracted (AVE)	LP	EP	IP
Longueur perçu	0.705	0.64	0.8		
Effort perçu	0.686	0.642	0.603	0.801	
Intérêt perçu	0.493	0.397	-0.395	-0.634	0.63

Conclusions du modèle CFA

Selon les données, une solution à trois facteurs est prometteuse selon le modèle CFA. L'évaluation de la durée de l'enquête montre un facteur de fardeau élevé pour la longueur perçue, ce qui explique environ 92 % de la variation de cet indicateur (communalité élevée). Quant au deuxième item, le temps perçu, sa saturation factorielle est relativement faible, c'est-à-dire que moins de 10 % de sa variation est expliquée par la longueur perçue. Malgré la faible communalité du deuxième indicateur, AVE ($>0,6$) et CR ($>0,7$) sont dans une fourchette idéale, ce qui confirme la structure factorielle.

Le facteur EP (effort perçu) représente environ 70 % de la variance du premier indicateur (propension à abandonner) et environ 20 % du deuxième indicateur (difficulté). Malgré le fait qu'une communauté de 20 % ne soit pas idéale, AVE et CR se situent tous les deux dans des limites idéales, confirmant la structure factorielle du EP.

Enfin, l'IP explique moins de la moitié de la variation des indicateurs associés (intérêt pour les nouvelles enquêtes et volonté de participer). Les deux ont des saturations factorielles acceptables ($>0,6$), mais l'AVE et le CR n'ont pas respecté la limite idéale. Par conséquent, certains aspects de l'IP restent inexpliqués par les indicateurs disponibles. Il peut être nécessaire d'ajouter plus de questions à l'enquête, ou les questions peuvent devoir être posées différemment. Ceci sera accepté comme une limite de notre étude.

Tous les indicateurs ont été chargés conformément à la théorie et aux hypothèses et se sont révélés statistiquement significatifs. Les répondants évaluant le sondage comme trop long ainsi que le temps qu'il a fallu pour le remplir étaient associés à une plus grande longueur perçue. Plus, l'enquête est difficile et plus la tentation de partir est grande, plus il faut d'efforts pour participer à l'enquête. Enfin, le fait de trouver l'enquête intéressante et d'être disposé à participer à de nouvelles enquêtes était positivement et significativement lié à l'IP.

Modèle structurel

Après confirmation du modèle de mesure, l'étape suivante consiste à étudier la relation entre les constructions latentes en réalisant un modèle structurel. Nous avons défini le modèle structurel sur la base des hypothèses suivantes, dont certaines sont théoriques et dont certaines doivent être testées. Le fardeau a été traité comme une variable de réponse unique.

- H1 : Les répondants sont accablés par des enquêtes plus longues.
- H2 : Les répondants font face à des fardeaux plus importants en raison des efforts plus importants qu'ils doivent fournir pour répondre à une enquête.
- H3 : Un plus grand intérêt pour les enquêtes entraîne un fardeau moindre.
- H4 : Augmenter l'effort requis pour répondre à une enquête augmente la perception du temps passé à le compléter.
- H5 : Les enquêtes avec un niveau d'intérêt plus élevé chez les répondants nécessitent moins d'efforts pour être complétées.

En conséquence, le modèle structurel hypothétique a été établi en faisant passer des flèches unidirectionnelles de LP, EP et IP au fardeau, de IP à EP et enfin de EP à LP (Figure 2-32).

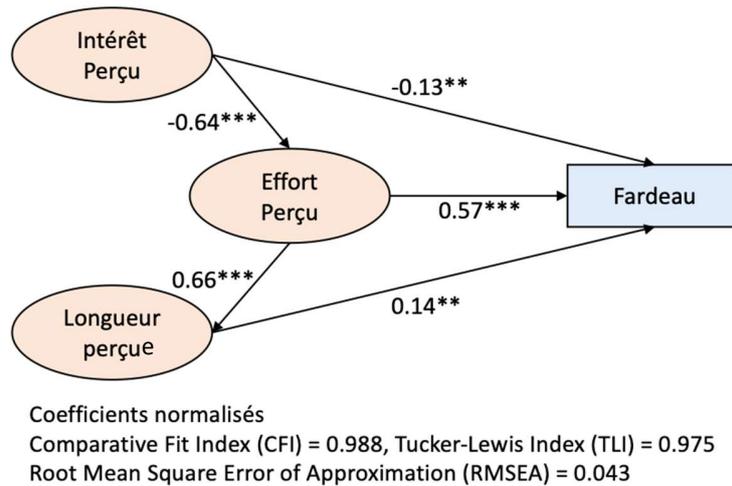


Figure 2-32. Un diagramme de chemin des spécifications des modèles structurels et de mesure

Indices d'ajustement du modèle

Selon les résultats, le CFI et le TLI sont respectivement de 0,988 et 0,975. Le fait que les deux soient > 0,95 indique un bon ajustement. Le RMSEA était égal à 0,043, ce qui est inférieur au seuil de 0,045, indiquant un très bon ajustement. Nous pouvons conclure que les données ont été bien modélisées puisque tous les indices d'ajustement ont atteint de très bons seuils.

2.8.5 Conclusions et discussion

Selon le modèle SEM, toutes les estimations suivent la direction attendue et se révèlent significatives. En commençant par les effets directs, l'IP est négativement lié au fardeau, de sorte que les répondants qui ont exprimé un niveau d'intérêt plus élevé se sentent moins chargés. Les estimations de régression ont révélé une association significative entre un plus grand effort requis pour répondre à l'enquête et un plus grand fardeau du répondant. De plus, les résultats de régression du fardeau qui étaient significatifs et positifs suggèrent que les répondants à l'enquête se sentiraient davantage accablés lors d'enquêtes plus longues. Il a été démontré que l'effort requis pour répondre à une enquête influence considérablement la perception des répondants quant à la durée de l'enquête. De plus, l'intérêt des répondants à participer à l'enquête a considérablement affecté l'effort requis pour répondre à l'enquête. Les résultats étaient cohérents avec la littérature antérieure qui considérait l'intérêt comme une mesure de l'EP (Fricker, Kreisler et al. 2012).

Dans ce modèle, deux effets de médiation ont été trouvés et présentés dans le Tableau 2-23:

1. EP sert de médiateur entre IP et Fardeau (IP → EP → Fardeau)
2. La LP agit comme médiateur entre EP et Fardeau (EP → LP → Fardeau).

Sur la base de la signification statistique des effets directs et indirects, une médiation partielle est suggérée (Cheung et Lau 2008, Shankar, Jebarajakirthy et al. 2020).

Les effets totaux ont montré que l'EP avait un effet plus important sur le fardeau que les deux autres, suivi d'une estimation de régression relativement élevée de l'IP. La fardeau LP a eu le plus petit effet.

Tableau 2-23. Relation entre les construits basés sur les estimations SEM

	relation	Effet direct	Effet indirect	Effet total
H1	Longueur perçu à Fardeau	0.142**	-	0.142***
H2	Effort perçu à Fardeau	0.568***	0.094**	0.662***
H3	Intérêt perçu à Fardeau	-0.133**	-0.361***	-0.495***
H4	Effort perçu à Longueur perçu	0.663***	-	0.663***
H5	Intérêt perçu à Effort perçu	-0.636***	-	-0.636***

*p-value < .05, **p-value < .01, ***p-value < .001

Le fardeau du répondant n'est toujours pas conceptualisé de manière adéquate sur la base de ce que nous avons appris. Comme le confirme notre étude, le fardeau est un concept multidimensionnel qui est influencé par une variété de facteurs (Fricker, Yan et al. 2014). Bien que le modèle de mesure satisfasse à la validité discriminante pour les trois facteurs, la cohérence interne et la validité convergente n'ont été établies que pour LP et EP, mais pas pour IP. Cela montre que cette étude présente certaines lacunes qui devront être comblées dans de futures recherches. En prenant le facteur IP comme point de départ, CFA suggère qu'il peut y avoir d'autres aspects cachés qui peuvent être expliqués par cette construction. Il est nécessaire de se demander si davantage de questions doivent être posées ou si les questions actuelles doivent être reformulées pour couvrir les différents aspects de l'IP. Cela augmentera non seulement les chances de respecter la validité de construit, mais facilitera également l'association de plus de deux indicateurs aux construits IP, ce qui remplira également la règle des trois indicateurs. Cela s'applique également aux deux autres construits qui n'ont pas satisfait à la règle des trois indicateurs malgré leur succès à respecter la fiabilité et la validité convergente-divergente.

Dans la présente étude, le fardeau a été considéré uniquement comme une tâche subjective d'un individu, dans laquelle les répondants n'étaient interrogés que sur leurs perceptions. Toutefois, pour comprendre et quantifier le fardeau, il est également nécessaire d'examiner le fardeau de manière objective. De nombreux facteurs contribuent au développement du fardeau, tels que le nombre de questions, le type de questions (comme choisir sur une carte, question à choix binaire, à choix multiples), le nombre de mots pour les questions ou les choix, l'interface graphique, etc. Dans les futures recherches, il sera important de développer des indicateurs pour quantifier le fardeau objectivement et de rechercher des liens entre le fardeau tel que défini subjectivement et objectivement.

2.9 Conception de réseaux cyclables par algorithme génétique

- Par : David Murray, maîtrise
- Supervision : Pre Catherine Morency
- Contexte : Chaire Mobilité
- Date de fin prévue : septembre 2023

2.9.1 Introduction

La rue est une ressource fortement sollicitée en milieu urbain (Zheng & Geroliminis, 2013). En Amérique du Nord, la rue était historiquement perçue comme un espace servant à faciliter le mouvement de véhicules, au détriment des autres usages et usagers de la rue (Delbosc et al., 2018; Gössling et al., 2016; Jordan & Ivey, 2021; Lefebvre-Ropars et al., 2021). Ce paradigme de développement a encore des répercussions aujourd’hui puisque de nombreuses villes allouent disproportionnellement l’espace de rue à l’automobile privée par rapport aux autres modes de transport, ce qui augmente la dépendance à l’automobile (Creutzig et al., 2020; Jordan & Ivey, 2021). Effectivement, un indicateur d’écart offre-demande développé par Lefebvre-Ropars et al. (2021) a démontré que dans de nombreux arrondissements de la Ville de Montréal, les cyclistes et les passagers d’autobus se voient allouer moins d’espace de la rue versus la demande observée, et ce à l’inverse des automobilistes.

De plus en plus, de nombreuses grandes villes cherchent à encourager un transfert modal vers des modes de transport plus durables afin de réduire la congestion automobile, les émissions de gaz à effet de serre, la pollution de l’air et l’espace nécessaire au stationnement, entre autres (Creutzig et al., 2020; Gössling et al., 2016). Sachant que le choix modal en transport est surtout fonction de la commodité, de la rapidité, de la sécurité perçue, du coût et des impacts sur la santé d’un mode en particulier (Gössling et al., 2016), il va sans dire que l’allocation de l’espace de rue aux différents modes a une incidence sur le choix modal et donc sur le transfert modal souhaité. En effet, il a été démontré à de nombreuses reprises que l’environnement bâti peut exercer une influence importante sur le choix modal des personnes (Cervero, 2002; Susilo & Maat, 2007). Ceci rappelle notamment le concept de demande latente; certaines personnes voudraient effectuer leurs déplacements en mode actif, mais se voient forcées d’utiliser un autre mode en raison de contraintes tel un manque d’infrastructure adéquate pour les modes actifs (Clifton & Moura, 2017; Morency et al., 2020).

2.9.2 Problématique

Considérant les cibles gouvernementales en matière de mobilité durable et de réduction des émissions de gaz à effet de serre (Gouvernement du Québec, 2018), beaucoup de municipalités cherchent à investir en infrastructure de transport active et collective. Par exemple, la Ville de Montréal a mentionné, dans son Projet de Ville, vouloir créer des aménagements plus propices aux déplacements à pied ou à vélo, par exemple par l’agrandissement de son réseau cyclable (Ville de Montréal, 2021). Certains décideurs ont donc exprimé une volonté d’agir, mais se butent à une question : où investir et pourquoi (Broach et al., 2012)? Ce projet de recherche souhaite donc offrir un outil d’aide à la conception de réseaux cyclables à l’échelle d’une ville afin de soutenir la prise de décision des administrations publiques.

Ainsi, considérant la demande de transport observée et latente et un désir d’encourager la mobilité durable, ce projet de recherche vise à étudier la question de recherche suivante :

Considérant la demande observée et latente ainsi qu’un certain budget disponible, quel est le réseau cyclable optimal pour une ville?

En d'autres termes, on cherche à identifier sur quelles rues une ville devrait construire son réseau cyclable pour qu'il soit optimal selon la demande cyclable observée et latente.

Une sous-question implicite de la question de recherche est la notion d'optimalité d'un réseau cyclable. Cette notion sera développée davantage dans ce projet de recherche.

La méthode développée devra répondre à quelques critères, notamment :

1. **Applicabilité** : on souhaite que la méthode développée soit applicable dans des cas réels (i.e. réseau de transport réel et demande de déplacement réelle) et non des cas fictifs à petite échelle comme parfois présenté dans la littérature (voir section suivante). La méthode doit être applicable en pratique et non pertinente uniquement d'un point de vue théorique.
2. **Transférabilité** : on souhaite que cette méthode soit applicable à différents territoires. Bien que la méthode soit développée et calibrée à partir des données de la région de Montréal, on souhaite que celle-ci puisse être utilisée relativement facilement ailleurs. La grande majorité des villes de moyenne et grande taille dans le monde possèdent un réseau cyclable et ces villes cherchent toutes à concevoir un réseau optimal. Ainsi, on pose comme critère que la méthode développée leur soit applicable aussi.

Dans ce projet, on considère la structure du réseau (i.e. positionnement des rues) comme étant fixe puisque celle-ci est largement contrainte par la localisation des bâtiments en milieu urbain. Il n'est pas réaliste de déplacer des bâtiments pour optimiser un réseau de transport. Ainsi, à partir d'un ensemble de liens d'un réseau de transport existant, l'objectif est donc de sélectionner le sous-ensemble de liens constituant le réseau optimal respectant la contrainte de budget disponible.

2.9.3 Revue de littérature

2.9.3.1 Demande de déplacement

Afin de déterminer quel est le réseau cyclable optimal, il faut savoir où se déplacent les gens. Typiquement, cette information provient d'enquêtes de type « Origine-Destination » où l'on sonde une portion de la population à propos de ses déplacements de la veille. On demande, entre autres, l'origine, la destination, l'heure de départ et d'arrivée, le mode de transport utilisé ainsi que le motif de déplacement.

La demande cyclable totale est définie comme suit :

$$\text{Demande cyclable totale} = \text{demande cyclable observée} + \text{demande cyclable latente}$$

L'enquête Origine-Destination montréalaise permet, en ne conservant que les déplacements effectués à vélo, d'avoir une estimation de la demande cyclable observée. Il s'agit des déplacements observés dans l'enquête qui ont été effectués à vélo.

La demande latente (ou demande potentielle) est définie par Clifton et Moura (2017) comme étant l'ensemble des activités et déplacements souhaités, mais non réalisés en raison de contraintes. La demande latente est la portion non-observée de la courbe de demande qui se réalise lorsque le coût de déplacement diminue, ce qui résulte en une consommation accrue (Bonnell, 2004; Clifton & Moura, 2017). La demande latente comporte deux sources, soit la demande redistribuée et la demande générative. La demande redistribuée représente tout changement au niveau de l'espace, du temps de parcours, de la fréquence ou du mode dans la demande précédemment observée en raison des changements relatifs des coûts de déplacement (Clifton & Moura, 2017). Il ne s'agit donc pas de nouveaux déplacements, mais bien d'une

redistribution des déplacements existants (dans ce cas, d'un autre mode vers le vélo). La demande générative, quant à elle, consiste en tout déplacement précédemment non-réalisé qui peut désormais être réalisé en raison de changements aux systèmes de transport (p. ex. l'ajout d'infrastructure) ou autres facteurs sociaux, économiques, culturels et technologiques (Clifton & Moura, 2017).

Ainsi, certains analystes en transport mentionnent qu'une demande latente sera activée par des améliorations à l'infrastructure et au niveau de service. Par exemple, comme mentionné par Dill et Carr (2003), des niveaux plus élevés d'infrastructures cyclables sont positivement et significativement corrélés avec des taux plus élevés de déplacements à vélo dans de nombreuses villes américaines. Ce phénomène s'applique également aux infrastructures routières. De nombreuses études, dont celles de Noland (2001) et Hymel (2019), ont démontré que l'augmentation de la capacité routière pour réduire la congestion n'a que des effets temporaires; après quelques temps, une demande latente pour ces infrastructures est générée, ce qui ramène le niveau de congestion à un point similaire à celui d'avant l'ajout de capacité. Il s'agit après tout d'un phénomène économique fondamental : les individus ont tendance à consommer davantage (c.-à-d. à se déplacer davantage) lorsque le coût (c.-à-d. le temps de déplacement) diminue.

La demande latente est importante à considérer dans ce projet de recherche. Les investissements dans les réseaux de transport devraient évidemment tenir compte de la demande observée, mais devraient également tenir compte de la demande latente afin d'identifier ce qui est réellement optimal. Optimiser un réseau cyclable uniquement selon la demande observée constituerait une grave erreur méthodologique. En effet, optimiser un réseau de transport en fonction des déplacements effectués sur ce réseau donnerait le réseau actuel, ce qui serait d'un faible intérêt. Il est donc nécessaire de considérer la demande latente (ou potentielle) cyclable. La prochaine section présente comment quantifier la demande latente puisqu'elle n'est pas directement observée.

2.9.3.2 Estimation de la demande latente

L'estimation de la demande latente se fait habituellement pour les modes actifs (marche et vélo) puisque les déplacements avec ces modes sont moins capturés par l'enquête automnale Origine-Destination de Montréal. Une méthodologie proposée par Morency et al. (2020) permet d'estimer une borne supérieure sur les déplacements à pied et à vélo à partir de données d'enquêtes de type Origine-Destination. Cette méthode se base sur une série de critères à appliquer sur tous les déplacements recensés dans l'enquête afin de savoir s'ils pourraient être effectués à pied ou à vélo. Les critères pour la marche sont les suivants (se référer à Morency et al. (2020) pour plus détails) :

1. L'âge de la personne qui se déplace doit être compris entre 4 et 90 ans;
2. La distance parcourue doit être inférieure à la distance seuil pour la marche;
3. Chaque distance parcourue dans la chaîne de déplacement doit être inférieure à la distance seuil pour marcher;
4. La distance totale de la chaîne de déplacement doit être inférieure à quatre fois la distance seuil.

On remarque que la méthodologie ci-dessus ne considère que quelques critères. Notamment, elle ne considère pas les conditions météorologiques, la température, l'élévation, l'état et la qualité des infrastructures piétonnes et cyclistes, la possession d'un vélo et la présence d'un réseau de vélopartage. Il n'y a pas non plus de critères sur le motif de déplacement (sauf dans le cas du vélo et des déplacements magasinage); on peut s'imaginer qu'il est difficile d'aller reconduire

quelqu'un à vélo mais pas infaisable, surtout que les personnes reconduites sont souvent des enfants. Les auteurs justifient ces omissions en mentionnant que les méthodologies proposées sont plus axées sur l'estimation d'une limite maximale de la demande pour les modes actifs qu'une estimation réaliste.

2.9.4 Design de réseaux cyclables

Dans la littérature scientifique, on remarque un intérêt croissant pour le problème de conception de réseaux cyclables à partir des années 2010, notamment grâce aux publications de Mauttone et al. (2017), Lin & Yu (2013), Duthie & Unnikrishan (2014), Zhu & Zhu (2020), Chen et al. (2020), Ospina et al. (2022), Doorley et al. (2020) et Liu et al. (2019). Ce nouvel intérêt est possiblement en raison de la croissance des investissements publics pour ce mode de transport à plusieurs endroits dans le monde depuis plusieurs années. Cette section présente un résumé de la littérature pertinente au sujet de la conception de réseaux cyclables afin de guider les choix méthodologiques présentés au chapitre 3.

2.9.5 Objectifs

On remarque différents objectifs dans la littérature concernant la conception de réseaux cyclables. Certaines études, comme celles de Lin & Yu (2013), Zhu & Zhu (2020), Ospina et al. (2022), Doorley et al. (2020) et Liu et al. (2019), ont comme objectif de sélectionner, parmi un ensemble de liens d'un réseau, lesquels devraient faire partie du réseau cyclable afin d'optimiser différents indicateurs. Or, certaines études, comme celles de Zuo & Wei (2019), Larsen et al. (2013) et Lowry et al. (2016) emploient une méthodologie similaire, mais se concentrent plutôt sur la priorisation des investissements en infrastructure. Pour ces études, on débute avec un réseau cyclable existant et une liste de projets potentiels à considérer. La méthode développée permet ensuite de prioriser ces projets en fonction de leurs bénéfices sur le réseau cyclable existant. Bien que le projet de recherche présenté dans ce mémoire soit du premier type, on considère également les études du second type dans cette revue de littérature puisque leur méthodologie comporte plusieurs similarités (voir section 2.9.6).

Pour calculer la qualité d'un réseau cyclable, plusieurs études calculent le coût de déplacement pour un grand nombre de paires Origine et Destination sur ce réseau (Chen et al., 2020; Liu et al., 2019; Mauttone et al., 2017). Les variables considérées lors de ce calcul peuvent varier grandement. Par exemple, Mauttone et al. (2017) et Doorley et al. (2020) considèrent la distance du chemin ainsi que la présence (oui ou non) d'une infrastructure cyclable sur chaque lien. Duthie & Unnikrishan (2014) ainsi qu'Ospina et al. (2022) considèrent uniquement la distance. En plus de considérer la distance, Lowry et al. (2016) considèrent également le niveau de stress provenant de la circulation automobile à proximité, l'élévation et le temps perdu en raison des virages aux intersections.

L'intégration de différentes variables au coût de transport ajoute deux principaux défis. Premièrement, une pondération réaliste de ces variables dans la fonction de coût généralisé requiert un calage avec une enquête Origine-Destination, ce qui peut être un projet de recherche en soi. Deuxièmement, il y a l'enjeu de disponibilité des données, par exemple pour le calcul du niveau de stress causé par la circulation automobile qui requiert une estimation de la vitesse de la circulation automobile sur chaque tronçon ainsi que le débit journalier moyen annuel.

2.9.6 Méthodes de résolution

Diverses méthodes de résolution sont employées dans la littérature. Mauttone et al. (2017) utilisent un algorithme génétique succédé par un algorithme de recherche locale. Dans cette méthode, l'algorithme génétique est utilisé pour faire l'exploration grossière de l'espace des solutions, puis l'algorithme de recherche local est utilisé pour raffiner la solution optimale trouvée. D'autres, comme Zhu & Zhu (2020), Chen et al. (2022) et Opsina et al. (2020), modélisent le problème comme un problème de programmation linéaire mixte en nombre entiers.

Larsen et al. (2013) proposent une méthode de priorisation des investissements cyclables avec un modèle par grille. Or, cette méthode comporte certains inconvénients. Premièrement, la méthode développée est une méthode agrégée, ce qui est peu pertinent puisque l'approche considérée dans ce mémoire est une approche par tronçon de rue et donc désagrégée. En raison de sa nature agrégée, la méthode développée ne permet pas d'évaluer l'impact de l'ajout d'un lien cyclable sur un tronçon de rue en particulier, ce qui l'empêche d'être considérée pour le présent projet de recherche.

Pour cette recherche, on décide de modéliser le problème comme un problème d'optimisation combinatoire, similairement à la méthode utilisée par Mauttone et al. (2017)

2.9.6.1 Algorithmes d'optimisation combinatoire pour problèmes de boîte noire

L'optimisation est une sous-branche des mathématiques ayant pour objectif de minimiser ou de maximiser une fonction f assujettie à certaines contraintes sur la solution. Il existe des dizaines d'algorithmes d'optimisation ayant chacun leurs propres caractéristiques, forces et faiblesses. Une sous-branche particulièrement pertinente pour ce projet de recherche est l'optimisation de boîtes noires (BBO : *black box optimization*). Une boîte noire est n'importe quel processus qui associe une entrée x à une sortie $f(x)$ où le fonctionnement de $f(x)$ n'est pas disponible analytiquement (Audet & Hare, 2017). Typiquement, cette boîte noire est un calcul informatique comme une simulation.

L'optimisation combinatoire est une branche de l'optimisation qui consiste à chercher une combinaison optimale d'objets parmi un ensemble. Pour ce projet de recherche, le problème mathématique à résoudre est un problème d'optimisation combinatoire de type boîte noire avec contraintes. Il existe plusieurs méthodes d'optimisation pouvant résoudre ce type de problème, notamment les algorithmes génétiques et l'algorithme *Mesh Adaptive Direct Search* (Audet & Hare, 2017).

2.9.6.1.1 Algorithme génétique

Un algorithme génétique est un type d'algorithme évolutionniste se basant sur la théorie de la sélection naturelle. Cet algorithme fait évoluer un groupe de solutions en appliquant des opérateurs inspirés de la biologie comme la mutation, le croisement et la sélection (Eiben & Smith, 2015).

Les algorithmes génétiques font partie de la famille des métaheuristiques. Les métaheuristiques, bien que souvent performantes pour résoudre un problème d'optimisation, n'offrent aucune garantie de succès contrairement à d'autres types de méthodes (Audet & Hare, 2017). En d'autres termes, ces approches n'offrent aucune garantie d'optimalité de la solution trouvée. Néanmoins, ces méthodes sont souvent utilisées en pratique en raison de leur simplicité d'implémentation et de compréhension ainsi que de leur efficacité pour certains types de problèmes. Il est important de noter que les algorithmes génétiques sont des algorithmes de recherche *globale*, c'est-à-dire qu'ils mettent l'accent sur la recherche d'une solution globalement décente à un problème versus

une solution locale très précise. Il est donc suggéré de combiner un algorithme génétique avec un algorithme de recherche locale, afin que l'algorithme génétique s'occupe de la recherche globale grossière et l'autre s'occupe ensuite du raffinement local de la solution trouvée (Audet & Hare, 2017).

Le principe général d'un algorithme génétique est d'utiliser le principe de la « survie du plus fort » afin d'éliminer les solutions de faible qualité et de combiner les solutions ayant le plus grand potentiel (Audet & Hare, 2017). En tout temps, l'algorithme génétique maintient un ensemble de solutions (la *population*) qu'il fait évoluer durant plusieurs *générations*. Une solution est encodée en tant que *chromosome* dans lequel chaque gène représente une variable du problème. Une solution possède un niveau d'aptitude (communément appelé *fitness* en anglais) correspondant à la valeur de la fonction à optimiser pour cette solution. Dans le cas des problèmes d'optimisation de minimisation, on tente de minimiser le niveau d'aptitude. La Figure 2-33 présente un exemple d'encodage sous forme de chromosome pour des variables binaires—formule typiquement utilisée pour des problèmes d'optimisation combinatoire¹.

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{11}	x_{12}	x_{13}
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1

Figure 2-33 : Exemple d'encodage de solution à 13 variables binaires sous forme de chromosome.

À chaque génération, une nouvelle population de solutions est créée à partir de la population précédente. La première étape est le processus de sélection vise à identifier les deux parents qui seront combinés pour former de nouveaux individus. Il s'agit généralement d'une sélection probabiliste où les individus ayant une meilleure aptitude ont plus de chance d'être sélectionnés, encore en lien avec la théorie de la sélection naturelle. Une fois deux parents sélectionnés, on procède au processus de croisement selon une probabilité p_c où l'on cherche à combiner des éléments des parents pour créer un nouvel individu. Il existe des dizaines de méthodes de croisement dans la littérature. Deux méthodes fréquemment utilisées dans le cas de chromosomes binaires sont les méthode de *croisement à un point* et de *croisement probabiliste* (Audet & Hare, 2017).

L'étape de croisement est l'étape par laquelle l'algorithme génétique combine deux solutions de la population pour en créer une théoriquement meilleure. On applique ensuite l'étape de mutation qui vise à modifier légèrement l'individu créé. Cela cherche à introduire une variation dans le bassin génétique, encore une fois inspiré de la théorie de l'évolution. En ayant cette étape de mutation, l'algorithme génétique est en mesure d'explorer une plus grande portion de l'espace des solutions, évitant ainsi de rester coincé dans des minimums locaux (Audet & Hare, 2017). Pour un encodage chromosomique binaire, la méthode d'inversion de gènes est typiquement utilisée (Eiben & Smith, 2015). Cette méthode inverse chaque gène d'un individu selon une probabilité p_m . Audet et Hare (2017) ainsi qu'Eiben et Smith (2015) recommandent de fixer la probabilité p_m à une valeur très faible pour éviter de trop perturber les solutions existantes.

Une fois la nouvelle génération d'individus constituée (étapes de sélection, croisement et mutation à répétition), on évalue leur niveau d'aptitude (*fitness*). On recommence ensuite ce

¹ L'algorithme décrit dans les paragraphes suivants n'est qu'une variante d'algorithme génétique parmi tant d'autres. Or, les algorithmes génétiques peuvent être très variés. On réfère aux ouvrages récents de Eiben et Smith (2015) et de Audet et Hare (2017) pour une description des variantes possibles.

cycle des dizaines de fois jusqu'à l'obtention d'une solution suffisamment bonne où jusqu'à ce que l'algorithme stagne, c'est-à-dire aucune amélioration de la meilleure solution.

Un algorithme génétique possède beaucoup de paramètres à fixer qui sont primordiaux pour obtenir un algorithme d'optimisation efficace. Ces paramètres, que l'on nomme généralement des *hyperparamètres*, contiennent entre autres la probabilité de croisement p_c , la probabilité de mutation p_m , la méthode de sélection, la méthode de croisement et la taille de la population. Il existe peu de règles générales concernant ces paramètres; il est donc généralement nécessaire de les calibrer pour chaque problème d'optimisation à traiter (Eiben & Smith, 2015).

2.9.6.1.2 Algorithme Mesh Adaptive Direct Search

Les travaux concernant cet algorithme seront faits ultérieurement.

2.9.7 Méthodologie

Les sections suivantes présentent respectivement les données utilisées, les définitions mathématiques et la méthode de résolution envisagée.

2.9.7.1 Données

La problématique présentée à la section 2.9.2 nécessite deux sources de données principales : une source de donnée permettant de connaître la structure actuelle du réseau de transport terrestre d'une ville ainsi qu'une source de données permettant d'estimer la demande cyclable actuelle et latente.

2.9.7.1.1 Le réseau – données d'OpenStreetMap

Pour obtenir les données du réseau de transport, on utilise les données du projet collaboratif OpenStreetMap. OpenStreetMap est un projet collaboratif de cartographie visant à créer une carte complète des installations humaines sur terre². Son fonctionnement est basé sur le même principe que celui de Wikipédia, à savoir une édition collective par les pairs. Chaque usager, avec un compte gratuit, peut modifier la carte pour y ajouter ou corriger des éléments, par exemple la localisation des rues, intersections, feux de signalisation, arrêts d'autobus, commerces, parcs, etc. L'utilisation des données d'OpenStreetMap est gratuite et accompagnée d'une licence très permissive requérant uniquement une mention d'attribution à OpenStreetMap et à ses contributeurs³. Les données sont facilement accessibles grâce à un API public et à divers outils disponibles de téléchargement et de modification. La manière de coder les éléments est publique et discutée par les membres de la communauté afin d'obtenir un consensus régional. Pour ces raisons, on utilise fréquemment les données d'OpenStreetMap dans divers projets de recherche, notamment à la Chaire Mobilité.

Pour ce projet de recherche, on utilise les données d'OpenStreetMap pour avoir une représentation filamenteuse du réseau routier d'une ville afin d'identifier l'ensemble des liens où pourraient se trouver les liens cyclables.

² https://wiki.openstreetmap.org/wiki/About_OpenStreetMap

³ <https://www.openstreetmap.org/copyright>

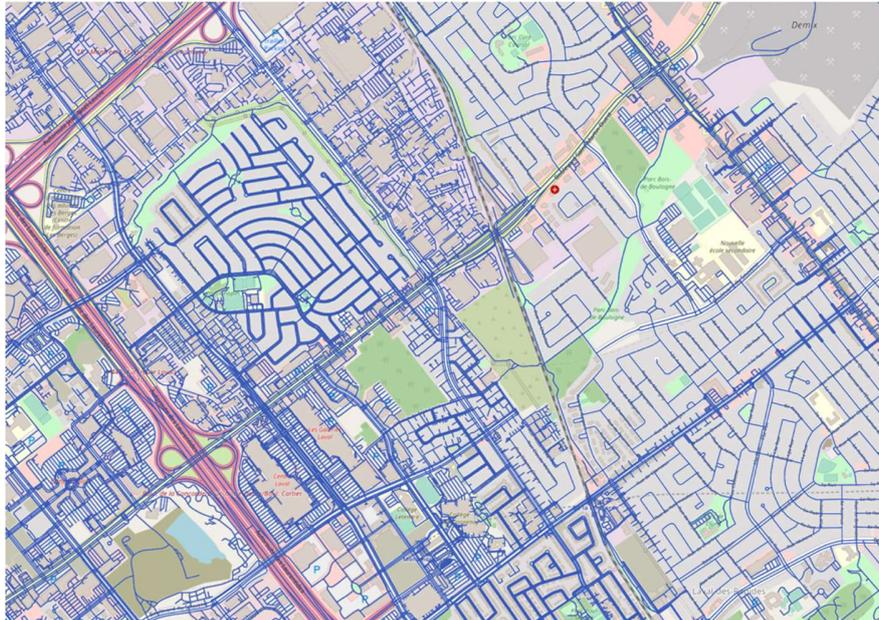


Figure 2-34: Exemple d'extraction du réseau routier pour une portion de la ville de Laval à partir d'OpenStreetMap

Simplification du réseau

En analysant la Figure 2-34, on remarque que l'extraction du réseau routier résulte en un très grand nombre de liens. Si l'on veut appliquer la méthode à l'échelle d'une ville, il est nécessaire de procéder à une simplification pour que le problème soit analytiquement traitable. Cette simplification est effectuée en plusieurs étapes comme suit :

1. Conserver uniquement les liens de niveau primaire, secondaire et tertiaire. Cela a pour effet de retirer, par exemple, les autoroutes et leurs bretelles, les chemins de services et chemins privés (incl. stationnements), les trottoirs et les rues résidentielles.
2. Consolider les intersections afin de réduire le nombre de liens lors des croisements. Par exemple, lorsque deux boulevards ayant chacun un terre-plein central se croisent, le nombre de points d'intersection est quatre et le nombre de segments créés est 12. En regroupant les intersections qui se trouvent dans un rayon r l'une de l'autre en un unique point d'intersection, on arrive à réduire le nombre de liens du réseau. On sélectionne $r = 11\text{ m}$ en fonction de la taille typique des intersections sur l'île de Montréal.
3. Connecter les liens contigus en retirant les nœuds interstitiels.
4. Retirer les liens parallèles. Après consolidation des intersections, certains boulevards auront désormais deux liens parallèles qui ont le même nœud de début et de fin. On peut donc en conserver un seul.

2.9.7.1.2 La demande – données de l'enquête Origine-Destination de 2018

Pour la demande de déplacements, on se base sur la méthodologie développée par Morency et al. (2020) et présentée à la section 2.9.3.1. À partir de l'enquête Origine-Destination de 2018, cette méthodologie est utilisée pour estimer la demande actuelle et potentielle cyclable et résulte en un échantillon de 67,826 déplacements cyclables observés et potentiels pour la grande région de Montréal. L'algorithme d'optimisation se basera sur cette hypothèse de demande pour identifier le réseau optimal.

2.9.7.2 Définition du problème

Un réseau cyclable est défini par un vecteur $X = [x_1, x_2 \dots x_n]$, où chaque variable x_i est une variable binaire indiquant si le $i^{\text{ème}}$ lien est inclus dans le réseau ou non. Par exemple, le vecteur $X = [1, 1, 0, 1, \dots]$ indiquerait que les deux premiers liens de l'ensemble des liens potentiels sont inclus dans le réseau, le 3^e ne l'est pas, le 4^e l'est, etc.

Afin d'identifier le réseau cyclable optimal, il est nécessaire de concevoir une mesure de la qualité d'un réseau. Pour ce faire, on introduit les notions de *déplacement réalisable* et de *déplacement non réalisable*. Un déplacement entre une origine et une destination est dit *réalisable* s'il existe un chemin ininterrompu sur le réseau cyclable qui débute et termine dans un rayon de 500 mètres de l'origine et de la destination. À l'inverse, un déplacement entre une origine et une destination est dit *non-réalisable* s'il n'existe pas de tel chemin.

La notion de qualité d'un réseau (nommé *coût du réseau* ci-après), que l'on cherche à minimiser, est définie par l'équation suivante :

$$C = C_{NR}N_{NR} + \sum_i^{N_R} C_{Temps}D_i \quad (1)$$

Soumis à la contrainte suivante :

$$\sum_i^{N_L} L_i x_i C_L \leq B \quad (2)$$

Le réseau optimal $X^* = [x_1, x_2 \dots x_n]$ est celui qui minimise le coût C :

$$X^* = \arg \min_X C$$

Le tableau ci-dessous présente une description de chaque variable utilisée pour la modélisation du problème.

Tableau 2-24: Liste des variables utilisées dans la modélisation du problème

Variable	Signification
C	Coût d'un réseau (\$ ⁴)
C_{NR}	Coût d'un déplacement non réalisable (\$)
N_{NR}	Nombre de déplacements non réalisables sur un réseau
N_R	Nombre de déplacements réalisables sur un réseau
N_T	Nombre total de déplacements dans l'hypothèse de demande. $N_T = N_R + N_{NR}$
C_{Temps}	Valeur du temps (\$/h)
D_i	Durée du $i^{\text{ème}}$ déplacement sur le réseau (h)
N_L	Nombre de liens potentiels du réseau cyclable
x_i	Variable binaire indiquant si le $i^{\text{ème}}$ lien est inclus dans ce réseau cyclable
L_i	Longueur du $i^{\text{ème}}$ lien du réseau (km)
C_L	Coût par kilomètre de construction d'un lien cyclable (\$/km)
B	Budget d'investissement disponible (\$)

⁴ Malgré le fait que cette variable soit mesurée en dollars, sa valeur n'est pas directement interprétable.

L'équation (1) ci-dessus représente le coût d'un réseau cyclable. Pour calculer ce coût en pratique, on procède comme suit. Pour chaque déplacement dans l'hypothèse de demande, on vérifie si celui-ci est réalisable. S'il l'est, on calcule son temps de parcours D_i que l'on multiplie ensuite par une valeur du temps C_{Temps} pour obtenir son coût de déplacement en dollars. S'il n'est pas réalisable, on ajoute une pénalité fixe de C_{NR} dollars. En minimisant le coût total (équation 1), on se trouve à minimiser à la fois le nombre de déplacements non réalisables ainsi que le coût total des déplacements réalisables.

Le problème est soumis à une contrainte de budget (équation 2) afin d'obtenir une solution réaliste. Sans cette contrainte, la solution optimale est évidemment la solution triviale où chaque rue de la ville comporte un lien cyclable, ce qui n'est pas réaliste.

Le problème possède uniquement quatre paramètres à sélectionner, soit le coût d'un déplacement non réalisable (C_{NR}), la valeur du temps (C_{Temps}), le coût par kilomètre de construction d'un lien cyclable (C_L) et le budget disponible (B). La longueur de chaque lien L_i est calculée à partir des données de réseau filaires d'OpenStreetMap

Ce problème est donc un problème d'optimisation combinatoire. Il s'agit d'un problème d'optimisation de type boîte noire puisque la fonction de coût provient d'un calcul informatique sans représentation algébrique évidente.

2.9.8 Conclusion

Ce projet de recherche vise à développer une méthodologie pour identifier le réseau cyclable optimal pour un territoire en fonction de la demande observée et latente. Ce rapport présente l'état d'avancement du projet durant l'année 2022, incluant la présentation de la problématique, la revue de littérature et la modélisation du problème.

Les prochaines étapes anticipées en 2023 pour ce projet de recherche sont les suivantes :

1. Calibration des différents paramètres de l'algorithme génétique (taille de population, type de croisement, probabilités de croisement et de mutation, élitisme, etc.). Cette étape est cruciale puisque la performance d'un algorithme génétique dépend fortement de ses paramètres.
2. Évaluation de la méthode de résolution pour un petit territoire. Cela permettra de voir si un algorithme génétique est une manière efficace pour résoudre ce problème d'optimisation.
3. Évaluation de l'impact des différents paramètres de l'algorithme (valeur du temps, coût d'un déplacement non réalisable) sur le réseau cyclable optimal identifié.
4. Comparaison de la performance de l'algorithme *Mesh Adaptive Direct Search* (MADS) avec l'algorithme génétique.
5. Conception d'une méthode pour sous-diviser le problème. En effet, si l'on veut optimiser le réseau cyclable pour l'entièreté du Grand Montréal, on aura un problème d'optimisation ayant environ 3 000 variables. Cela est beaucoup trop pour être traitable par les algorithmes d'optimisation existants. Il est donc nécessaire d'avoir une méthode pour sous-diviser le territoire en plus petites sections que l'on pourra ensuite traiter individuellement. Intuitivement, cela semble être une idée raisonnable, puisque le réseau cyclable sur la rive-nord ne devrait pas avoir d'impact sur la conception du réseau sur la rive-sud.

2.10 Scénarios de réduction de GES pour Montréal

- Par : Hubert Verreault, ing., professionnel de recherche
- Contexte : Chaire Mobilité – initiation des travaux dans le cadre d'un contrat de R&D avec la Ville de Laval

2.10.1 Introduction

Au Québec, les émissions de gaz à effet de serre (GES) provenant du secteur des transports ont augmenté ces dernières années, représentant maintenant environ 43%⁵ des émissions totales de GES. La Ville de Montréal s'est fixé des objectifs en matière de réduction des émissions de GES, avec pour objectif de réduire les émissions de 55% d'ici 2030 par rapport à 1990 et la carboneutralité d'ici 2050⁶.

Le gouvernement du Québec a, pour sa part, mis en place un plan pour réduire les émissions de GES dans la province, avec pour objectif de réduire les émissions de GES de 37,5% en 2030 par rapport à 1990 ainsi que la carboneutralité d'ici 2050⁷. Pour atteindre cet objectif, le gouvernement s'est engagé à mettre en place des politiques et des programmes visant à réduire les émissions de GES dans tous les secteurs, y compris le secteur des transports. Historiquement, les cibles de réduction de GES annoncés par les différents paliers de gouvernements n'ont pas été atteintes. La principale stratégie mise de l'avant par celui-ci dans le domaine du transport est l'électrification des véhicules motorisés. Cette stratégie a l'avantage d'en permettre l'estimation sur les GES émis relativement facilement. Cependant, cette stratégie n'encourage pas un changement des comportements de mobilité et demeure une solution ayant des externalités négatives lorsque l'on considère la sphère sociale et économique de la mobilité durable (et les autres impacts environnementaux associés notamment à l'extraction des métaux requis pour la production des batteries).

Dans ce contexte, il est légitime de se questionner sur les impacts que pourraient entraîner d'autres stratégies visant à réduire les GES émis par le transport dans la région de Montréal. Est-ce que des stratégies, autres que l'électrification, ayant des externalités positives pourraient également être mises de l'avant afin de contribuer à la réduction des GES en transport ? L'estimation de scénarios plus spécifiques demande cependant un développement méthodologique afin de bien mesurer les réductions de GES en lien avec l'implantation de la stratégie.

Alors, cette étude vise à proposer un cadre général d'évaluation des réductions potentielles de GES pour différents scénarios de transformation de la demande de transport dans la région de Montréal. En utilisant l'approche "Réduire, transférer et améliorer", cette étude examine différents scénarios qui permettraient de réduire les émissions de GES du secteur des transports, en modifiant les comportements de mobilité de la population de la région de Montréal. Les scénarios visent essentiellement à estimer un potentiel de réduction de GES qui permettront de comprendre par la suite les stratégies les plus prometteuses. Ces travaux découlent du développement méthodologique réalisé dans le cadre d'un mandat de R&D réalisé avec la Ville de Laval dans le cadre de l'établissement de leur cible de réduction de GES.

⁵ <https://www.quebec.ca/gouvernement/politiques-orientations/plan-economie-verte/actions-lutter-contre-changements-climatiques/reduire-ges-transport>

⁶ <https://montreal.ca/articles/plan-climat-montreal-objectif-carboneutralite-dici-2050-7613>

⁷ <https://montreal.ca/articles/plan-climat-montreal-objectif-carboneutralite-dici-2050-7613>

2.10.2 Méthodologie générale

Cette section vise à expliquer le cadre général d'évaluation des réductions potentielles de GES développé dans le cadre de cette étude. L'estimation des GES liée au transport dans une région apporte quelques défis visant la mesure de cet indicateur. Premièrement, le portrait de la mobilité que l'on possède à l'échelle de la région de Montréal est incomplet. Bien que les enquêtes Origine-Destination brossent un portrait général de la mobilité des personnes, plusieurs types de déplacements sont plus ou moins répertoriés dans ces enquêtes comme les déplacements de services, les déplacements sur la route ou le transport de marchandises. Il faut néanmoins établir une situation de référence, à partir des meilleures données disponibles, afin de pouvoir mesurer les impacts de différents scénarios de transformation de la demande. Ce portrait doit en plus permettre de mesurer l'impact, sur les GES, de la transformation de la demande en transport. Il faut donc associer les émissions aux comportements et non seulement les lier à des litres d'essence vendus.

Par la suite, à partir du scénario de référence, il faut estimer les impacts potentiels de certains scénarios théoriques et combinaisons de scénarios basés sur différentes hypothèses de transformation de la demande en transport et sur les comportements de mobilité observés. La combinaison de différents scénarios est également une tâche complexe qui est loin d'être triviale.

La méthodologie générale se décompose en différentes étapes :

- 1- Développer une méthodologie d'estimation des GES qui prend en considération les caractéristiques des déplacements comme le mode utilisé, le taux d'occupation des véhicules ou la vitesse des véhicules.
 - a. Estimation des GES du scénario de référence
- 2- Développement de différents scénarios de modification de la demande en transport
 - a. Estimation des GES de chacun de ces scénarios
- 3- Comparaison des scénarios avec le scénario de référence.

La Figure 2-35 illustre les différentes étapes de la méthodologie générale.

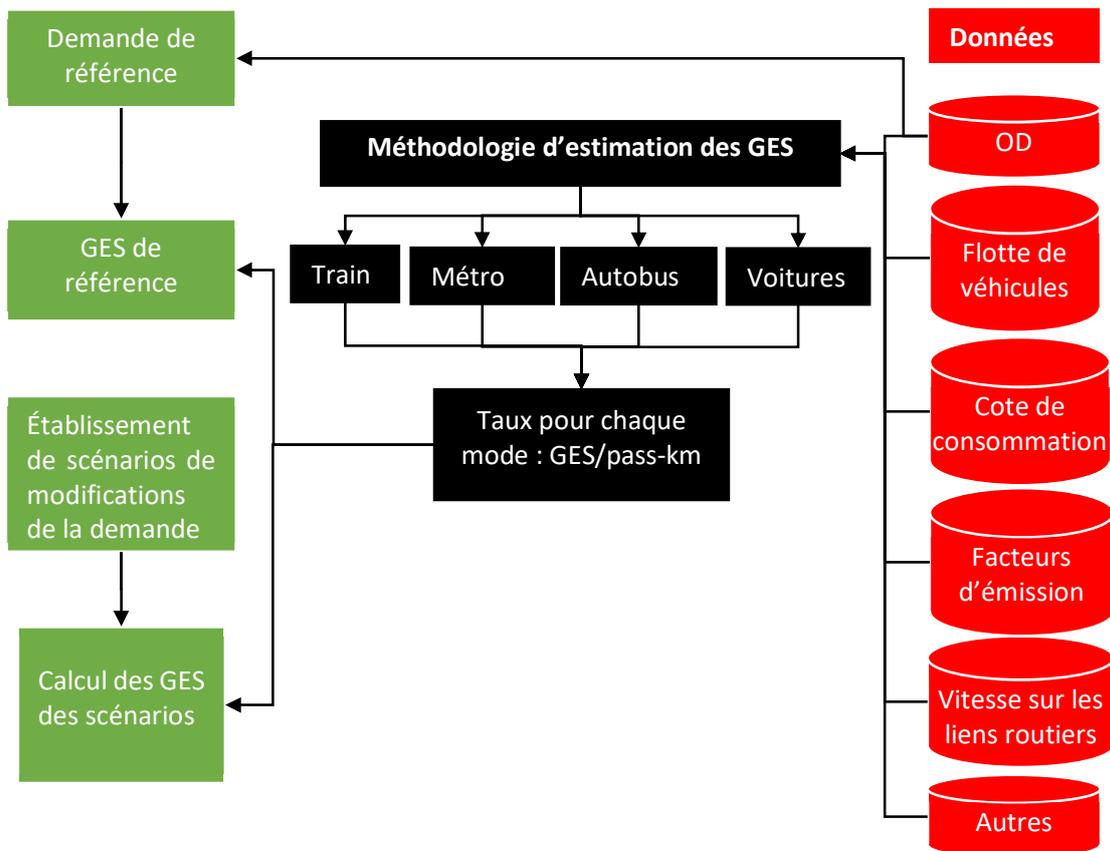


Figure 2-35 Schéma méthodologique général

2.10.2.1 Hypothèses

La méthodologie développée se base sur certaines importantes hypothèses. Premièrement, l'ensemble des résultats sont estimés pour un jour moyen de semaine d'automne de 2018. Bien qu'il soit possible de régionaliser la majorité des résultats présentés, seuls les résultats couvrant l'ensemble du territoire de l'enquête Origine-Destination 2018 de la région de Montréal sont présentés. De plus, la grande majorité des scénarios présentés dans la section résultats ne sont pas cumulables. Ces résultats doivent donc être considérés indépendamment l'un de l'autre. Finalement, les résultats témoignent des GES émis par les résidents de la région seulement. Les personnes visitant le territoire ou le traversant ne sont pas considérées dans les résultats.

2.10.2.2 Ensembles de données

Plusieurs ensembles de données sont utilisés dans le cadre de cette étude. Il est à souligner que d'autres ensembles de données, autres que ceux décrits dans cette section, sont utilisés dans le cadre de l'estimation des différents scénarios de modification de la demande. Cependant, ces ensembles de données seront présentés lors de la présentation de la méthodologie associée.

Enquête Origine-Destination.

Le principal ensemble de données utilisé demeure cependant l'enquête Origine-Destination de 2018 de la région de Montréal. Certaines variables, le temps de parcours et les distances réseau sous simili-congestion, ont été ajoutées au fichier de base afin de permettre d'estimer les quantités de GES de la façon la plus précise possible. Ces données servent à estimer la demande

de référence en transport mais, également pour faire varier les taux d'occupation des automobiles en fonction de la journée.

Facteurs d'émissions

Deux types de carburant ont été considérés dans cette étude, soit l'essence et le diesel. Les facteurs de conversion des litres de ces deux carburants en CO₂ eq/L sont directement pris du site web du gouvernement du Québec⁸. Les facteurs utilisés sont donc les suivants :

- Essence : 2,361 Kg CO₂ eq/L
- Diesel : 1,835 Kg CO₂ eq/L

Flotte d'automobiles

Afin de régionaliser la consommation moyenne des automobiles, les données de la SAAQ sont utilisées afin de déterminer le nombre d'automobiles détenues par les résidents de chaque municipalité. Les données sont segmentées selon la marque et le modèle des véhicules présents sur le marché. L'année de référence utilisée est 2018.

Cote de consommation des automobiles

Afin d'obtenir une cote de consommation moyenne des automobiles par municipalité, les données de la SAAQ segmentées par marque et modèle sont jumelées au guide de consommation des carburants de Ressources naturelles Canada. Cela permet donc d'obtenir une cote de consommation moyenne des véhicules possédés par municipalité.

Afin de simplifier les calculs, il est supposé que l'ensemble de la flotte, excluant les véhicules 100% électriques, utilise de l'essence comme combustible. Il est à souligner cependant qu'il avait très peu de véhicules 100% électriques dans la flotte en 2018.

Vitesse sur le réseau routier

Les vitesses sur les différents liens du réseau routier ont été estimées avec l'aide de données GPS provenant d'une flotte de véhicules de la région de Montréal. Ces données permettent donc d'obtenir les vitesses moyennes sur les liens en fonction de l'heure de la journée et permettent donc, de faire varier la cote de consommation des véhicules en fonction de la période horaire du déplacement.

2.10.2.3 Cotes de consommation selon le mode

Une méthodologie d'estimation des cotes de consommation détaillée a été développée pour l'ensemble des modes de transports motorisés utilisés par les résidents de la région en 2018. Ces modes sont respectivement les automobiles, le métro, l'autobus et le train. Il est à noter que pour les déplacements qui utilisent plus d'un mode pendant leur déplacement, chaque segment de ces déplacements est analysé de façon indépendante.

Déplacements en automobile

L'objectif est d'obtenir une cote de consommation pour chaque déplacement. Cette cote varie également en fonction de la région de domicile de la personne effectuant le déplacement, de l'origine et de la destination du déplacement et de la période horaire de celui-ci. Il est à souligner que l'on cherche ici à obtenir une cote de consommation moyenne par passager-km et non par véhicule-km.

La cote de consommation selon la région de domicile est estimée directement à partir des données de la SAAQ et de Ressources naturelles Canada. Par la suite, deux facteurs de correction

⁸ <https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/FacteursEmission.pdf>

sont appliqués à la cote de consommation moyenne à partir des caractéristiques des déplacements.

Le premier facteur de correction vise à transformer les cotes de consommation de véhicule-km à passager-km. Pour ce faire, le taux d'occupation moyen des véhicules selon la période horaire ainsi que la région d'origine et de destination sont utilisés. Le territoire a été divisé en 8 grandes régions pour les fins de ce calcul. Le taux d'occupation moyen des véhicules est estimé à l'aide de l'équation suivante :

$$\text{Taux d'occupation}_{Gr_{hr}, R_{orig}, R_{dest}} = \frac{\text{Dépl. } AC_{Gr_{hr}, R_{orig}, R_{dest}} + \text{Dépl. } AP_{Gr_{hre}, R_{orig}, R_{dest}}}{\text{Dépl. } AC_{Gr_{hr}, R_{orig}, R_{dest}}}$$

La transformation de la cote moyenne des véhicules en passager-km s'effectue avec l'équation suivante en fonction des caractéristiques de chaque déplacement :

$$\frac{L}{\text{passager} - \text{km}} = \frac{\text{Cote de consommation}(L/100\text{km})_{R_{Dom i}}}{\text{Taux d'occupation}_{Gr_{hre}, R_{orig}, R_{dest}}}$$

Le deuxième facteur de correction vise à modifier la cote de consommation en fonction de la vitesse moyenne des véhicules selon le corridor OD et la période horaire du déplacement. Pour chaque déplacement, les temps de parcours sous congestion ont été estimés. Comme indiqué précédemment, les temps de parcours sur les liens du réseau routier ont été estimés à l'aide de données GPS. Ces temps permettent donc d'estimer les vitesses moyennes des véhicules.

La méthode de correction de la cote de consommation en fonction de la vitesse se base sur les travaux de Nouri (2015). La Figure 2-36 illustre les facteurs de correction utilisés en fonction de la vitesse moyenne des véhicules estimés. Les facteurs de correction varient de 1,00 à 2,20 selon la vitesse.

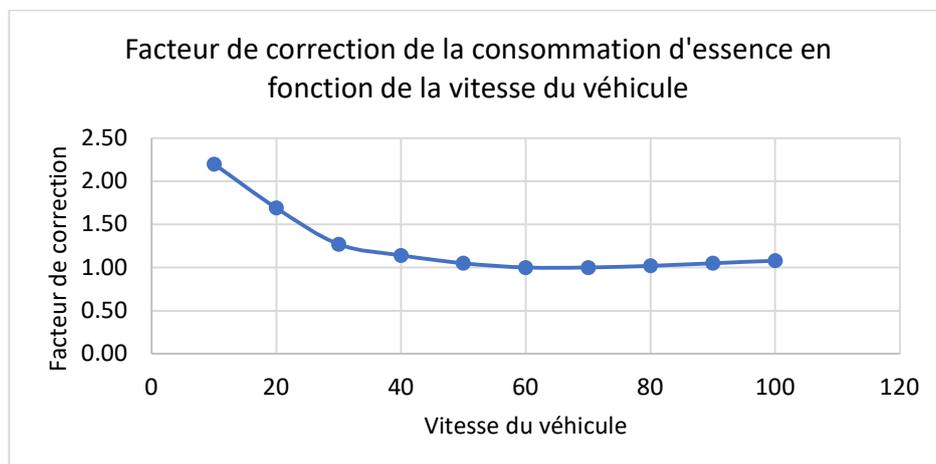


Figure 2-36 Facteur de correction de la consommation d'essence en fonction de la vitesse du véhicule

L'équation permettant d'estimer la cote de consommation finale par déplacement est la suivante :

$$\text{Cote}_{\text{Déplacement}_i} = \frac{\text{Cote de consommation}(L/100\text{km})_{R_{dom i}}}{\text{Taux d'occupation}_{Gr_{Hre}_i, R_{orig}_i, R_{dest}_i}} \times F_{\text{vitesse}}_{Gr_{Hre}_i, R_{orig}_i, R_{dest}_i}$$

Par la suite, cette cote de consommation peut être transformée en GES à l'aide du facteur de conversion de l'essence en CO₂ eq et de la distance réseau de chaque déplacement.

Déplacements en autobus

La cote de consommation par pass-km des autobus est basée sur plusieurs hypothèses et simplifications. Le manque de données détaillées à propos de la flotte d'autobus, de leur consommation et de leur achalandage au moment de cette étude explique principalement ces simplifications. Premièrement, il est supposé que l'ensemble de la flotte d'autobus utilisé dans la région de Montréal sont des autobus hybrides qui ont une consommation théorique moyenne de 45 L de diesel par 100 km. Afin de transformer cette cote de consommation par autobus à une cote par pass-km, des hypothèses concernant les taux d'occupation moyens des autobus sont posées. Il est donc supposé que le nombre moyen de passagers en période de pointe soit de 30 passagers et de 10 passagers en période hors-pointe. Les cotes obtenues, respectivement pour la période de pointe et hors-pointe, sont de 1,5 L/100 pass-km et de 4,5 L/100 pass-km. Ces cotes sont applicables pour tous les segments des déplacements utilisant un autobus, incluant les déplacements en bus scolaire.

Déplacements en train

Pour les déplacements utilisant le train, le taux d'émission de CO₂ eq / pass-km est tiré directement d'un rapport annuel d'exo⁹. Le taux utilisé est donc de 0,119 Kg CO₂ eq / pass-km.

Déplacements en métro

Pour les déplacements utilisant le métro, il a été supposé que le taux d'émission de CO₂ eq / pass-km est égal à 0 étant donné le mode de propulsion du métro.

2.10.2.4 Scénarios de modification de la demande en transport

Plusieurs scénarios de modification de la demande en transport ont été développés afin d'estimer leur potentiel à réduire les émissions de GES dans la région de Montréal. Ces scénarios ont été développés selon 3 axes :

- Réduire : Stratégies visant à diminuer les véhicules-kilomètres parcourus en automobile
- Améliorer : Stratégies visant à réduire les impacts de chaque kilomètre motorisé parcouru selon une demande modale constante
- Transférer : Stratégies visant à transférer la demande vers des modes plus sobres en carbone

Dans le cadre de cette étude, huit scénarios ont été développés. D'autres scénarios pourraient être estimés avec le cadre d'évaluation développé. Au total, quatre scénarios ont été développés dans l'axe réduire, deux dans l'axe améliorer et deux dans l'axe transférer. La Figure 2-37 illustre schématiquement l'ensemble des huit scénarios développés.

⁹ <https://exo.quebec/fr/actualites/rapport-ges-2019>

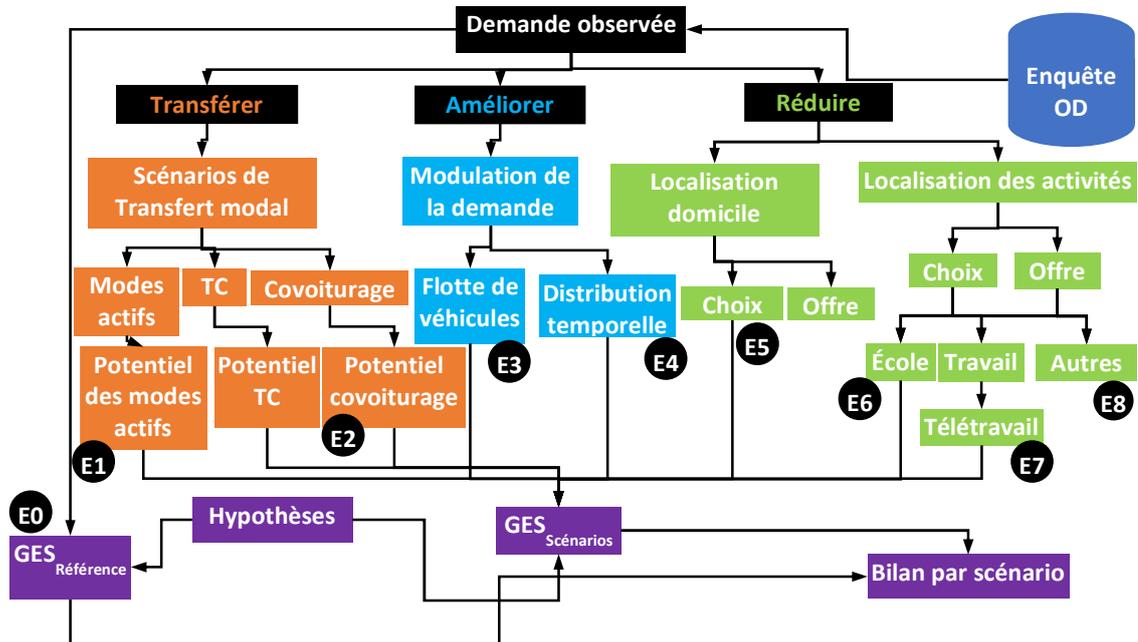


Figure 2-37 Schéma général de l'évaluation des scénarios de réduction des GES

Les huit scénarios évalués dans le cadre de cette étude sont décrits brièvement dans les prochaines sections. Des sources vers les méthodologies complètes et détaillées sont également disponibles pour la plupart d'entre eux.

E0 : Scénario de référence

Le scénario de référence vise à estimer les GES émis par la population de la grande région de Montréal pour un jour moyen de semaine d'automne. Cette estimation se base sur la demande en déplacement et en distance fournie par l'enquête OD 2018. La méthodologie se décompose en deux étapes. Premièrement, les passagers-km pour chacun des modes motorisés sont estimés à partir des segments de chacun des déplacements. Par la suite, les cotes de consommation précédemment mentionnées sont utilisées afin de transformer les passagers-km en GES. Au total, ce sont près de 112 millions de passagers-km motorisés qui sont effectués dans la GRM.

E1 : Potentiel des modes actifs

Objectif du scénario

Estimer l'impact sur les émissions de GES d'un certain transfert des déplacements motorisés vers la marche et le vélo.

Résumé méthodologique

La méthodologie se base principale sur l'estimation des passagers-km motorisés qui pourraient s'effectuer à la marche et/ou à vélo selon différents critères de transfert des déplacements. Plusieurs critères permettant d'identifier les déplacements latents à vélo et à la marche ont été utilisés principalement sur la base des distances seuils à la marche et à vélo, les chaînes de déplacements, l'âge des personnes et le motif de l'activité lié au déplacement. La méthodologie détaillée permettant d'estimer le potentiel des modes actifs est basée sur celle développée par Morency et al. (2020). Les données de déplacements utilisées proviennent de l'enquête OD 2018.

Les déplacements, initialement motorisés, latents à l'un de ces deux modes sont donc transférés comme des déplacements actifs. Leur taux d'émission de GES devient donc 0 kg de CO₂ eq/pass-km.

[E2 : Potentiel du covoiturage](#)

Objectif du scénario

Estimer l'impact sur les émissions de GES d'un certain transfert des déplacements en automobile vers le covoiturage.

Résumé méthodologique

La méthodologie se base principale sur l'estimation des passagers-km des déplacements auto-conducteur qui pourraient s'effectuer en covoiturage selon différents critères de transfert des déplacements. Les critères de jumelage des déplacements se basent principalement sur la proximité de l'origine, de la destination et de l'heure de départ des déplacements auto-conducteur. La méthodologie détaillée permettant d'estimer le potentiel de covoiturage est basée sur celle développée par Verreault et Morency (2016). Les données de déplacements utilisées proviennent de l'enquête OD 2018. Deux critères de proximité spatiale, soient 250 m et 1000 m, ont été utilisés pour les origines et les destinations. Deux critères de proximité temporelle ont également été utilisés, soient 15 minutes et 60 minutes. Le taux d'occupation maximum des véhicules a été supposé constant à 4 personnes par véhicule. Le jumelage de déplacements auto-conducteur permet donc d'augmenter le taux d'occupation moyen des véhicules et a donc un impact à la baisse sur les cotes de consommation par passager-km pour les déplacements en automobile.

[E3 : Transformation de la flotte de véhicules](#)

Objectif du scénario

Estimer l'impact sur les émissions de GES d'une cote de consommation moyenne des automobiles égale à celle des 15 véhicules les plus écoénergétiques de 2018.

Résumé méthodologique

La modification engendrée par ce scénario se situe au niveau de la cote de consommation moyenne des véhicules privés. En 2018, bien que cela varie selon la région de domicile, la cote moyenne de la flotte de véhicules de la région de Montréal était d'environ 10,5 L/100km. À partir des données de la flotte de véhicules ainsi que des données concernant les cotes de consommation des véhicules selon la marque et le modèle de Ressources naturelles Canada, la cote moyenne des 15 véhicules les plus écoénergétiques en 2018, excluant les quelques modèles 100% électriques, a été estimée. Une pondération a été effectuée en fonction du nombre de véhicules en circulation pour ces 15 véhicules. La cote moyenne pondérée pour ce sous-ensemble de véhicules était de 7,3 L par 100km. Pour estimer les GES pour ce scénario, la nouvelle cote de consommation remplace simplement la cote initiale dans la méthode d'estimation des GES. Tous les autres paramètres de la procédure restent constants.

Le Tableau 2-25 présente un extrait des véhicules les plus écoénergétiques pour 2018.

Tableau 2-25 Extrait des 15 véhicules les plus écoénergétiques en 2018

Marques	Modèles	L/100km	Ventes en 2018
HYUNDAI	IONIQ	4,3	446
KIA	NIRO	4,8	556
TOYOTA	PRIUS	5,8	1 573
FORD	C-MAX	5,9	11
MITSUBISHI	MIRAGE	6,6	373
CHEVRELET	SPARK	7,1	894
NISSAN	KICKS	7,2	665
HONDA	FIT	7,4	656
HYUNDAI	ACCENT	7,4	389
TOYOTA	YARIS	7,4	3 030
CHEVRELET	CRUZE	7,5	2 964
KIA	RIO	7,5	1 869

E4 : Modification de la distribution temporelle des déplacements

Objectif du scénario

Estimer l'impact sur les émissions de GES si 10% des déplacements effectués en période de pointe étaient transférés en période hors-pointe.

Résumé méthodologique

Ce scénario vise à estimer la réduction de GES en transférant des déplacements motorisés s'effectuant pendant la période de pointe du matin et du soir pendant les périodes hors-pointe. Ce transfert a un double effet selon le mode de transport. Pour les déplacements en transport en commun, ce transfert horaire augmente les émissions de GES pour ces déplacements car les taux d'émissions sont plus élevés en période hors-pointe par rapport aux pointes. Pour les déplacements en automobile, ce transfert implique une réduction des GES car les conditions de circulation sur les réseaux sont meilleures en période hors-pointe. Les déplacements pendant cette période ont donc un taux d'émission de GES moins élevé. Pour estimer la variation de GES, deux modifications sont donc effectuées dans la méthodologie générale. Pour les déplacements en transport en commun, le taux d'émission en période hors-pointe remplace celui de la pointe. Pour les déplacements en automobile, le facteur de correction concernant la vitesse des véhicules est modifié pour correspondre à celle de la période hors-pointe. Les déplacements sélectionnés sont répartis selon la distribution initiale des déplacements en hors-pointe selon l'heure de réalisation de ceux-ci. La Figure 2-38 illustre les distributions des déplacements selon l'heure de la journée avant et après le transfert des déplacements.

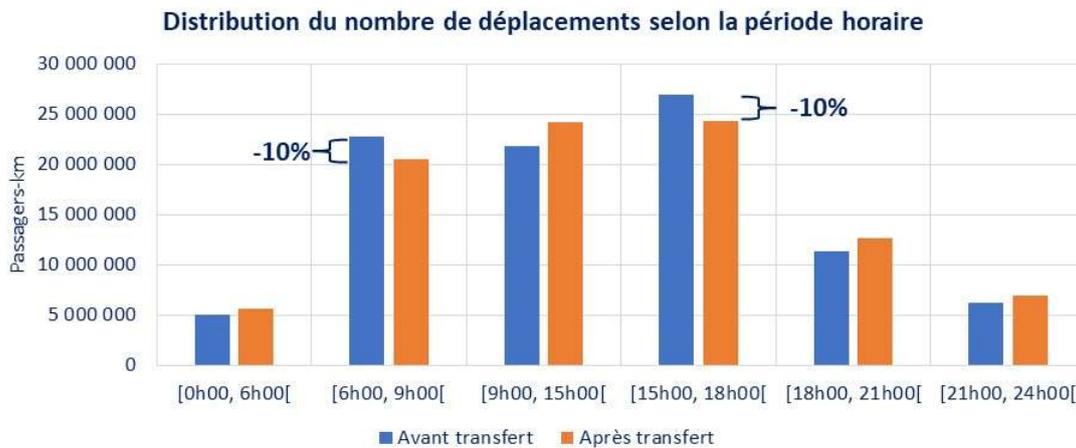


Figure 2-38 Distribution du nombre de déplacements selon la période horaire

Cette méthodologie s’appuie sur certaines hypothèses importantes. Premièrement, il est supposé que le mode des déplacements qui sont transférés entre périodes horaires reste constant. Il est également supposé que les taux d’occupation pour les automobiles restent constants pour les déplacements auto-conducteurs qui sont transférés en périodes hors-pointe.

E5 : Redistribution optimale des lieux de domicile

Objectif du scénario

Estimer l’impact sur les émissions de GES d’une redistribution optimale des ménages aux logements visant la minimisation des distances vers les lieux de travail et d’étude.

Résumé méthodologique

Ce scénario visait à évaluer l’impact sur la production de GES si les ménages de la région de Montréal emménageaient dans un logement qui minimise les coûts totaux de transport pour les déplacements étude et travail. La méthodologie détaillée de la procédure d’optimisation de l’allocation des ménages aux logements est basée sur celle développée par Morency et Verreault (2020). Avec les données de l’enquête OD 2018, la réduction des distances associées aux déplacements travail et étude est de 37%. Le différentiel de GES est donc estimé en fonction de cette réduction de distance pour ce type d’activités. Tous les autres paramètres de la procédure d’estimation des GES restent constants. Dans le cas de ce scénario, deux estimations indépendantes sont effectuées. Dans le premier cas, il est supposé que les modes restent constants malgré la diminution de la distance des déplacements. Dans le deuxième cas, les déplacements actifs latents sont estimés à partir des nouvelles distances des déplacements. Ces déplacements latents se voient attribuer par la suite un taux d’émission de GES de 0 CO₂ eq / Pass-km.

E6 : Allocation optimale des étudiants aux écoles

Objectif du scénario

Estimer l’impact sur les émissions de GES d’une allocation optimale des étudiants aux écoles visant à minimiser les coûts totaux de transport.

Résumé méthodologique

Ce scénario visait à évaluer l'impact sur la production de GES si les étudiants étaient alloués aux écoles en fonction de la distance entre le domicile et l'école. L'objectif était de minimiser les coûts totaux de transport des étudiants vers les écoles. La procédure d'optimisation se base sur plusieurs hypothèses. Par exemple, le niveau académique et le type d'école, privées ou publiques, sont considérés dans la procédure. La méthodologie détaillée est basée sur celle développée par Pépin (2012). Contrairement à l'ensemble des autres scénarios, les données de l'enquête OD 2018 ne sont pas utilisées afin de faire les estimations de ces scénarios. La procédure s'appuie sur des données d'inscription scolaire de 2013 fournies par le ministère de l'éducation du Québec. L'optimisation entraîne donc une baisse importante de l'ordre de 30% des distances de déplacements entre le domicile et le lieu d'étude (aller-retour). Afin d'estimer les distances par mode, la répartition modale des déplacements étude de l'enquête OD 2018, selon l'âge et la région de domicile a été utilisée. Il est supposé dans un premier temps que la répartition modale n'est pas modifiée par la réduction ou l'augmentation des distances séparant les étudiants des écoles.

Le différentiel de GES est donc estimé en fonction de cette réduction de distance pour ce type d'activité. Dans le cas de ce scénario, deux estimations indépendantes sont effectuées. Dans le premier cas, il est supposé que les modes restent constants malgré la diminution de distances. Dans le deuxième cas, les déplacements latents actifs sont estimés à partir des nouvelles distances de déplacements. Ces déplacements latents se voient attribuer par la suite un taux d'émission de GES de 0 CO₂ eq / pass-km.

E7 : Télétravail

Objectif du scénario

Estimer l'impact sur les émissions de GES si 10% des travailleurs effectuaient du télétravail à chaque jour de la semaine.

Résumé méthodologique

Une personne effectuant du télétravail lui permet habituellement de réduire sa mobilité vers son lieu de travail. Cependant, cela a aussi un impact sur les autres déplacements de sa chaîne d'activité. Les activités ont été segmentées en deux types, soit les activités contraintes (étude, reconduire / aller chercher quelqu'un) et les activités non contraintes (loisir, magasinage, autres). Il est supposé que les activités non-contraintes n'ont pas à être effectuées si la personne est en télétravail. Elle pourrait normalement faire ces activités lors d'une autre journée. Les activités contraintes doivent cependant être effectuées malgré le télétravail. Afin de bien mesurer l'impact sur les déplacements et les distances motorisées effectuées par un télétravailleur, les chaînes de déplacements qui concernaient le travail ont été altérées pour prendre en considération le télétravail et les activités contraintes. Certains déplacements et chaînes d'activités ont donc été créés afin de permettre au télétravailleur de faire ces activités malgré le télétravail. La méthodologie détaillée est disponible dans le rapport d'activités 2021 de la Chaire Mobilité (Chaire Mobilité, 2022). La Figure 2-39 illustre un exemple de l'altération de la chaîne d'activité d'un travailleur.

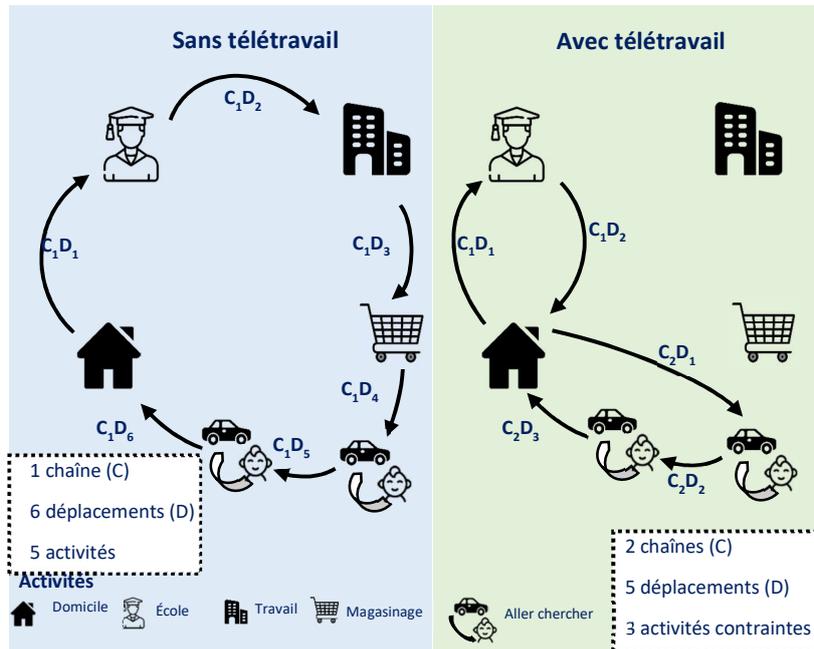


Figure 2-39 Exemple de l'altération de la chaîne d'activité d'un télétravailleur

Plusieurs hypothèses importantes sont posées dans le cadre de cette estimation. Premièrement, il est supposé que la demande demeure constante malgré la modification des comportements de mobilité. Cela signifie que le nombre de déplacements, outre ceux des chaînes concernant le travail et les heures d'activités restent constantes. De plus, il n'y a pas de nouveaux déplacements qui sont créés à la suite de l'amélioration des conditions de mobilité. Les lieux d'activités restent également les mêmes. Il est également supposé que 100% des travailleurs possèdent un emploi qui permet le télétravail. Finalement, on suppose que le télétravail est distribué uniformément pendant les jours de la semaine.

E8 : Rapprochement des lieux d'activités

Objectif du scénario

Estimer l'impact sur les émissions de GES si 10% des lieux d'activités pour le loisir et le magasinage se situant à plus de 500 m du domicile étaient localisés à 500 m de celui-ci.

Résumé méthodologique

Dans ce scénario, 10% des déplacements de plus de 500 m effectués pour le magasinage et le loisir ont été choisis aléatoirement. La distance de ces déplacements a ensuite été réduite à 500 m. La réduction de GES a été estimée à partir de la réduction de distances associée à cette modification. Tous les autres paramètres de la procédure restent constants. Dans le cas de ce scénario, deux estimations indépendantes sont effectuées. Dans le premier cas, il est supposé que les modes restent constants malgré la diminution des distances de déplacement. Dans le deuxième cas, les déplacements latents actifs sont estimés à partir de la distance de 500 m. Ces déplacements latents se voient attribuer par la suite un taux d'émission de GES de 0 CO₂ eq / Pass-km.

2.10.3 Résultats

Dans cette section, une synthèse des différents résultats obtenus est présentée. Bien qu'il soit possible de régionaliser les résultats obtenus, la majorité des résultats présentent un portrait 2018 correspondant à la grande région de Montréal. Les GES de référence pour la GRM sont premièrement présentés. Par la suite, les résultats synthèses des différents scénarios incluant le différentiel de GES par rapport au scénario de référence sont présentés.

Référentiel

La méthodologie d'estimation des GES à l'échelle de la GRM pour le scénario de référence permet d'estimer les GES totaux pour l'ensemble de la population et le taux de GES par pass-km. Au total en 2018, un peu plus de 112 millions de pass-km sont effectués lors d'un jour moyen de semaine. Ces déplacements entraînent une production de 23 280 tonnes de CO₂ eq pour l'ensemble de la région pour un taux de 208 g CO₂ eq par pass-km. Cette production de GES n'est cependant pas uniforme à l'échelle de la région. La Figure 2-40 illustre la répartition des GES émis selon la région de domicile des ménages. Les ménages résidant sur l'Île de Montréal émettent 28% du total. Bien que les couronnes Nord et Sud ne soient pas les plus peuplées, ce sont les régions qui produisent le plus de GES, soit 55% des GES totaux de la région de Montréal. Les distances de déplacements plus élevées ainsi qu'une densité de population plus faible pour ces secteurs contribuent à cette production plus élevée de GES.

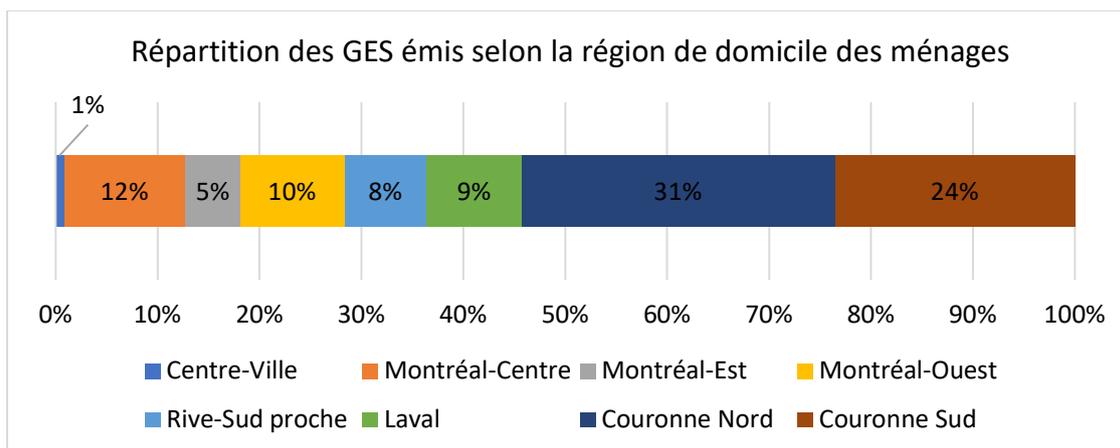


Figure 2-40 Répartition des GES émis selon la région de domicile des ménages

Le Tableau 2-26 présente le taux de production de GES par personne selon la région de domicile. Plus la distance avec le centre-ville de Montréal augmente, plus le taux de production de GES par personne augmente. Les taux les plus élevés se situent dans les couronnes Nord et Sud, ce qui est cohérent avec la Figure 2-40.

Tableau 2-26 Valeurs de référence pour la grande région de Montréal

Région	GES (kgCO ₂ eq) /personne
Centre-Ville	2.20
Montréal-Centre	2.66
Montréal-Est	3.94
Montréal-Ouest	4.85
Rive-Sud proche	4.52
Laval	5.14
Couronne Nord	7.76
Couronne Sud	7.24

Résultats synthèses des scénarios

À partir du cadre méthodologique présenté précédemment, les différentiels de GES ont été estimés pour les huit scénarios présentés. Le Tableau 2-27 présente la synthèse de ces résultats pour chaque scénario.

Tableau 2-27 Tableau synthèse des réductions de GES par scénario

Scénarios	Réduction de GES	Incluant le potentiel des modes actifs
Potentiel des modes actifs	-5,0%	NA
Potentiel du covoiturage SCN : 250 m, 15 min	-0,5%	NA
Transformation de la flotte de véhicules De 10,5 à 7,3 L/100 km	-29,4%	NA
Distribution temporelle Par tranche de 10%	-3,0%	NA
Redistribution optimale des lieux de domicile	-25,1%	-29,5%
Allocation optimale des enfants aux écoles	-1,2%	-1,6%
Télétravail Par tranche de 10% de télétravailleurs	-5,9%	NA
Rapprochement des lieux d'activités		
Magasinage	-0,49%	-0,52%
Loisir	-0,91%	-0,94%

L'ensemble des scénarios évalués permet de réduire les GES comparativement au scénario de référence représentant la demande de 2018. Cependant, certains scénarios semblent avoir plus de potentiel afin de réduire les GES de la GRM. Le scénario le plus performant est celui visant à

faire la transformation de la flotte de véhicule avec des véhicules plus écoénergétiques. La réduction de la cote de consommation des véhicules privés de 10,5 à 7,3 L aux 100 km permettrait de réduire de 19,3% les GES émis dans la région. Ce scénario permet d'illustrer que si l'ensemble de la population faisait des meilleurs choix sur le type de motorisation ainsi que sur la taille des véhicules achetés, il pourrait y avoir un impact immédiat sur la quantité de GES émis.

Le deuxième scénario ayant le plus potentiel est la redistribution optimale des lieux de domicile. Cette allocation optimale permettrait de réduire les GES respectivement de 25,1% ou de 19,3% selon la prise en compte ou non du potentiel des modes actifs. Bien que nous ne puissions jamais obliger les ménages à déménager, ce scénario démontre que le choix du lieu de résidence pour un ménage est important dans la quantité de GES que ce ménage va émettre pendant les jours de semaine par la suite.

Le télétravail est un autre scénario qui démontre un fort potentiel de réduction des GES. Pour chaque tranche de 10% de télétravailleurs par jour, il est estimé que les GES diminuent de 5,9%. Les dernières années démontrent qu'un fort pourcentage de travailleurs peut maintenant faire du télétravail.

Le potentiel des modes actifs démontre également qu'encourager les résidents à faire des déplacements à vélo ou à la marche lorsqu'il est possible de le faire pourrait avoir un impact important sur les GES émis. Ce scénario permet de réduire de 5,0% les GES du scénario de référence. De plus, ce scénario peut également s'ajouter à d'autres scénarios évalués comme la redistribution optimale des lieux de domicile et de cette façon, augmenter encore plus les réductions de GES estimées.

2.10.4 Conclusion

La méthodologie développée dans le cadre de cette étude comprend plusieurs limitations qui sont importantes à expliciter. Premièrement, les GES, autant pour le scénario de référence que les scénarios de transformation de la demande en transport, concernent uniquement les GES qui sont émis lors des déplacements quotidiens de semaine. Aucune analyse du cycle de vie n'a été effectuée. Cela teinte les résultats obtenus de certains scénarios comme l'électrification de la flotte de véhicules privés puisqu'on néglige les GES découlant de la production des véhicules. Deuxièmement, plusieurs hypothèses ont été émises à propos des taux d'émissions de GES selon le mode de transport. Par exemple, le calcul des taux d'émissions par pass-km pour les autobus devra être raffiné afin d'obtenir des résultats plus fiables. Pour l'ensemble des hypothèses explicitées dans la méthodologie, une analyse de sensibilité devra être effectuée afin de connaître l'impact de celles-ci sur les résultats. Une autre hypothèse importante spécifiée dans la méthodologie concerne l'hypothèse de demande constante. Cette hypothèse est probablement valide lorsque la modification de la demande de transport est petite. Cependant, pour certains scénarios où la transformation de la demande est importante, cette hypothèse n'est pas valide.

La majorité des scénarios présentés sont des scénarios théoriques; atteindre leur valeur maximale est impossible en pratique. Néanmoins, ces scénarios montrent pour quelles stratégies il y aurait un potentiel de réduction de GES important et permettent de réfléchir à des stratégies innovantes visant la réduction des GES pour le transport des personnes. Cette étude démontre également que l'électrification des véhicules privés, bien qu'elle soit nécessaire, n'est pas la seule stratégie qui devrait être mise de l'avant afin de réduire rapidement les émissions de GES de la population de la région de Montréal. De plus, d'autres scénarios pourraient également s'ajouter au cadre conceptuel développé dans le cadre de cette étude. Par exemple, un scénario basé sur la démotorisation des ménages serait intéressant à estimer. Il est intéressant de souligner que le

cadre conceptuel développé permettrait également de s'intéresser à des indicateurs autres que les GES. Par exemple, il pourrait s'appliquer à d'autres sphères de la mobilité durable comme l'activité physique découlant des déplacements de la population.

2.11 Analyse automatisée du stationnement sur rue

- Par : Jean-Simon Bourdeau, ing., professionnel de recherche
- Contexte : Chaire Mobilité – contrat de R&D avec l'Agence de Mobilité Durable

2.11.1 Introduction

L'élément majeur que l'automobile a modifié dans l'utilisation du sol est le stationnement (Shoup, 2005). Il existe cependant peu d'outils permettant de le gérer. Ainsi, pouvoir quantifier le stationnement est un besoin bien présent des autorités locales et régionales.

L'objectif de la présente recherche est de développer un outil d'analyse automatisée du stationnement sur rue. Cet outil se veut ouvert et doit uniquement utiliser des données ouvertes. De plus, la méthodologie développée afin de créer l'outil est transparente, celle-ci est décrite dans la prochaine section. L'outil a été développé avec les données de la ville de Montréal mais celui-ci peut être transposé à d'autres territoires pour autant que les données soient disponibles. L'outil est également dynamique en ce sens qu'il est possible de mettre à jour les données entrantes à la demande. En outre, la validité des résultats produits dépendra de la fréquence de mise à jour de ces données. Finalement, l'outil est personnalisable en ce sens que plusieurs éléments en entrée pour exécuter la méthode peuvent être paramétrés à même l'outil.

2.11.2 Méthodologie

2.11.2.1 Données

Le Tableau 2-28 présente l'ensemble des sources de données qui alimentent l'outil. La première source de données utilisée est la base de données SIGNALEC, qui contient l'ensemble de la signalisation verticale, ce qui comprend notamment la signalisation sur le stationnement sur rue. Ce premier ensemble de données sera nécessaire afin de déterminer quels types de véhicules pourront se stationner sur la voie publique et quand. La géobase double sert à construire les bords de rues qui serviront à faire le référencement linéaire de tous les autres types de données. Un ensemble de données sur les bornes d'incendie est également utilisé puisqu'il est interdit de se stationner à proximité d'une borne d'incendie. Les actifs de voirie contiennent quant à eux des données sur les intersections, les ruelles ainsi que les bordures de trottoirs. Les données sur les vignettes de stationnement sur rue réservé aux résidents (SRRR) sont également intégrées, de même que les données sur les places tarifées sur rue, aussi connues sous le nom de parcomètres. La position des stations du système de vélopartage Bixi avec le nombre de points d'ancrage est également intégrée. Dernièrement, une archive des données sur les *entrées privées* est importée. La fréquence de mise à jour des données est également indiquée au Tableau 2-28. La plupart du temps celle-ci est au moins mensuelle, sauf pour les bornes d'incendie pour lesquelles la fréquence de mise à jour est annuelle, cependant celles-ci varient assez peu dans le temps.

Tableau 2-28 Description des sources de données utilisées (Bourdeau et Morency, 2022)

Type de données	Description	Fréquence de mise à jour, lorsque disponible
SIGNALEC	Signalisation verticale	Mensuelle
Géobase double	Réseau routier représentant les bords de rue	Hebdomadaire
Actifs de voirie (ruelles, bordures, intersections)	Polygones représentant les actifs de voirie	Mensuelle
Bornes d'incendie	Position des bornes d'incendie	Annuelle
Stations Bixi	Position et état des stations Bixi	Continue (API)
Zones SRRR	Polygones délimitant les zones de stationnement sur rue réservés aux résidents (SRRR)	-
Vignettes SRRR	Vignettes SRRR émises	Hebdomadaire
Places tarifées sur rue	Position des places tarifées sur rue (parcomètres)	Inconnue
Entrées privées	Polylignes représentant les entrées charretières	Aucune

2.11.2.2 Codification des panneaux de stationnement (Bourdeau, 2014)

Afin de pouvoir utiliser les données de SIGNALEC pour pouvoir déterminer les endroits où le stationnement sur rue est permis, la signalisation de stationnement doit être codifiée. En date du mois de septembre 2021 il y avait 2022 types uniques de panneaux de signalisation de stationnement dans la base de données de SIGNALEC. Le Tableau 2-29 illustre un exemple de codification d'un type de panneau de stationnement qui est montré à la Figure 2-41. La description correspond au texte qui est inscrit sur le panneau. Ensuite, une série de champs sont ajoutés pour chaque jour de la semaine afin de déterminer la plage temporelle d'application du type de panneau. Lorsque la restriction est saisonnière, la date de début et de fin de l'application est également indiquée. Le champ *type* permet de déterminer lorsqu'applicable quel type de véhicule peut stationner dans la zone. Les types possibles sont : autobus scolaire, autobus autre, mobilité réduite, livraison, SRRR (vignette), taxi, visiteurs, véhicules d'urgence, entretien, garderie, véhicule électrique (recharge) et autre. Finalement, le champ *fleche_pan* permet de déterminer le sens de la flèche inscrite sur le panneau, avec les codes suivants : 0 s'il n'y a pas de flèche, 2 s'il y a une flèche vers la gauche et 3 s'il y a une flèche vers la droite.

Tableau 2-29 Exemple de codification de la signalisation de stationnement

CODE_RPA	SB-BF
DESCRIPTION	\P 07h-09h LUN. MER. 1 MARS AU 1 DEC.
DUREE_MAXIMALE_MINUTES	
Q	0
LU	1
LU_DEBUT	7
LU_FIN	9
MA	0
ME	1
ME_DEBUT	7
ME_FIN	9
JE	0
VE	0
SA	0
DI	0
ANNUEL	0
DATE_DEBUT_1	60
DATE_FIN_1	335
TYPE	
FLECHE_PAN	



Figure 2-41 Panneau utilisé pour l'exemple de codification de la signalisation de stationnement

2.11.2.3 Référencement linéaire

Une fois que la codification de la signalisation de stationnement est terminée, il est possible de procéder au référencement linéaire. Le référencement est effectué directement lors de l'importation des données. À l'exception de la géobase double, tout élément ponctuel qui est importé dans la base de données sera associé linéairement au tronçon de la géobase le plus proche, en autant que la distance entre l'élément et le tronçon le plus proche soit inférieure à 10 mètres. Pour les points et les lignes, les éléments sont associés directement au tronçon le plus proche alors que pour les polygones ceux-ci sont discrétisés en points et les points sont individuellement associés à la géobase. La Figure 2-42 montre un exemple de référencement linéaire sur un tronçon de la géobase double. Il est possible d'y voir des éléments ponctuels comme des bornes d'incendie (en rouge) ou des polygones comme une ruelle (en brun) ou la bordure de trottoir le long du tronçon (en jaune). Les étiquettes numériques indiquent la position de l'élément, en mètres, le long du tronçon de la géobase double.

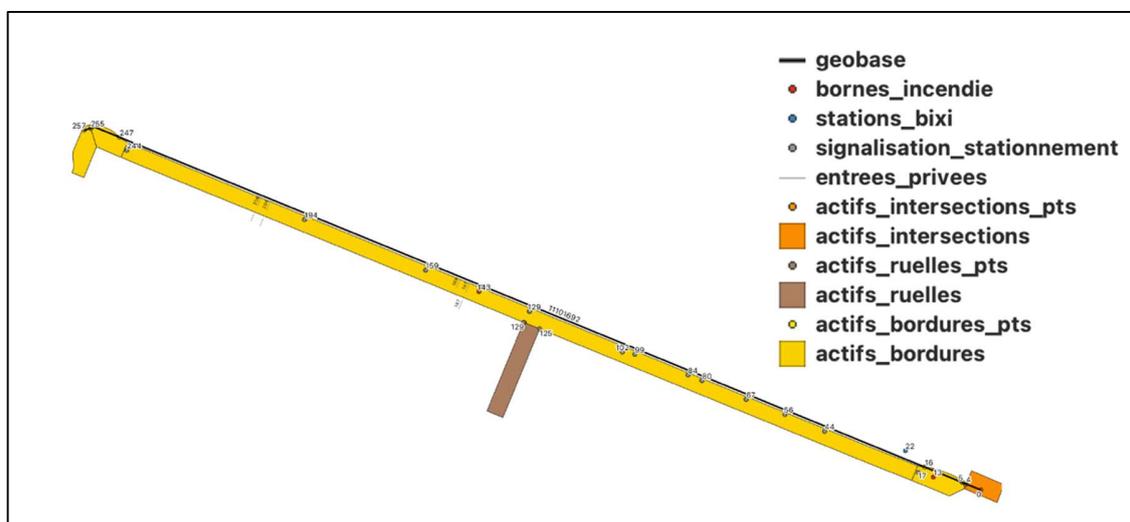


Figure 2-42 Référencement linéaire sur la géobase double (Bourdeau et Morency, 2022)

2.11.2.4 Logigrammes de traitement des données

Le premier logigramme sert à déterminer le sens de codification des flèches sur les panneaux par rapport à l'orientation du tronçon de la géobase double sur lequel ils se trouvent. Tel qu'il a été montré dans la section précédente, la valeur de 2 pour le champ fleche_pan correspondra à un panneau de début de zone alors que la valeur de 3 correspondra à un panneau de fin de zone. Dans certains cas il arrive que le tronçon de la géobase double est en contradiction avec la codification du champ fleche_pan. Dans ce cas, la signification du champ fleche_pan est inversée: 3 pour un panneau de début de zone et 2 pour un panneau de fin de zone. Le logigramme de détermination de l'orientation des flèches des panneaux est présenté à la Figure 2-43.

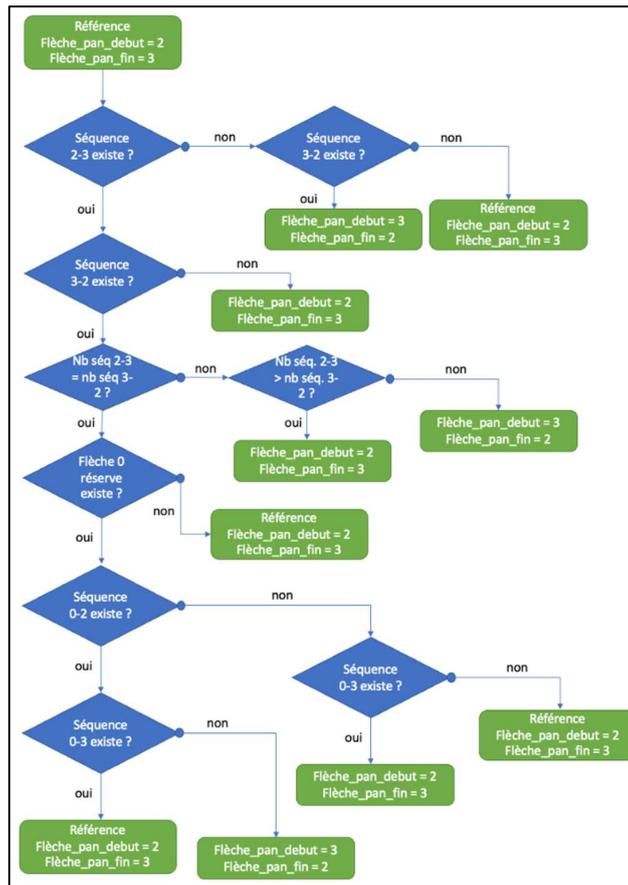


Figure 2-43 Logigramme de détermination du sens de codification des flèches (Bourdeau et Morency, 2022)

Le deuxième logigramme sert à créer les zones de stationnement au moyen du traitement de la signalisation de stationnement précédemment codifiée. Le logigramme de création des zones est présenté à la Figure 2-44. Au départ, il s'agit de déterminer si une zone existe déjà ou non. Si une zone existe déjà (cas 1 et 2), il faut déterminer si un changement de zone est présent ou pas. Dans le cas où aucune zone n'existe encore (cas 3, 4 et 5), il s'agit d'évaluer si un début de zone est présent ou pas.

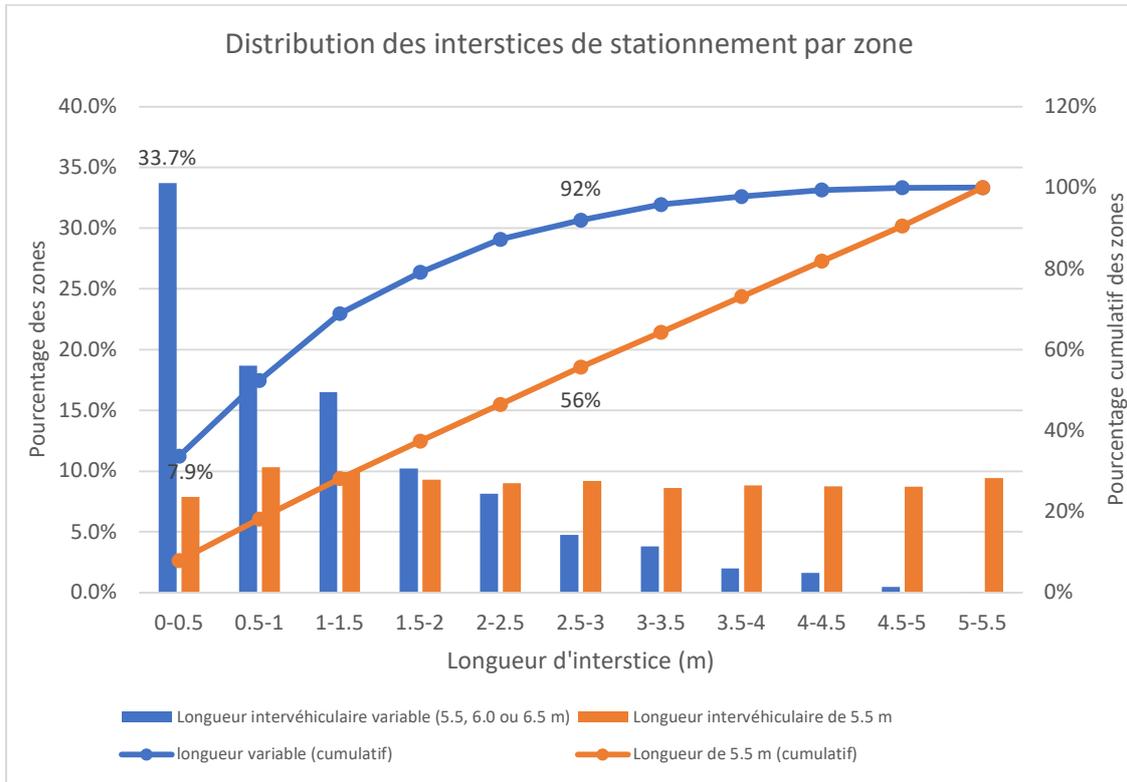


Figure 2-45 Distribution des interstices de stationnement par zone de stationnement

Enfin, le Tableau 2-30 montre quant à lui la longueur totale des interstices de stationnements pour les mêmes quatre arrondissements pour lesquels les données étaient disponibles afin d'appliquer la méthode. Il est possible de constater que la longueur totale des interstices pour l'ensemble des zones représente entre 7.8 % et 9.3 % de la longueur totale des zones pour des longueurs intervéhiculaires respectivement de 5.5 mètres et 6.5 mètres. En utilisant une longueur variable, il est possible de réduire la longueur à seulement 3.2 % de la longueur totale des zones de stationnement. Ces pourcentages peuvent sembler faible mais lorsqu'ils sont appliqués à plusieurs arrondissements il serait théoriquement possible de réduire la longueur des interstices de plus de 21 km en utilisant une longueur variable de véhicules (donc d'espaces de stationnement) comparativement à des véhicules d'une taille uniforme de 5.0 mètres.

Tableau 2-30 Relation entre la longueur intervéhiculaire et la longueur totale des interstices de stationnement

Longueur intervéhiculaire	Longueur totale des interstices / pourcentage de la longueur totale des zones
5.0 mètres	36.7 km (7.8 %)
6.0 mètres	40.5 km (8.6 %)
6.5 mètres	44.0 km (9.3 %)
Longueur variable (5.0, 6.0 ou 6.5 m)	15.1 km (3.2 %)

2.11.3.2 Utilisation des zones de stationnement sur rue réservé aux résidents (SRRR)

Le deuxième résultat qu'il a été possible de produire avec l'outil est une estimation de l'utilisation des zones de stationnement sur rue réservé aux résidents (SRRR) pour les mêmes quatre arrondissements que dans la section précédente (Outremont, Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension, Le Plateau-Mont-Royal et Ville-Marie). Afin de quantifier l'utilisation des zones SRRR, le nombre de vignettes SRRR détenues dans une zone donnée est divisé par le nombre de places SRRR de la zone. Cet indicateur a été mesuré le lundi 9 mai 2022 à 20h00. Cet indicateur permet d'avoir une idée de la relation entre l'utilisation potentielle (les vignettes) et l'offre (les places). L'indicateur varie beaucoup, entre 0.75 à Outremont et 11.2 dans Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension. Il est important de comprendre que cet indicateur ne témoigne pas de la difficulté des détenteurs de vignettes à se stationner mais bien d'une normalisation du nombre de vignettes en fonction du nombre de places SRRR. Il est également important de comprendre que l'indicateur peut varier énormément dans le temps. En regardant la carte illustrée à la Figure 2-46 il est cependant possible de constater que les zones avec les ratios les plus élevés se trouvent loin du centre-ville, principalement au nord dans l'arrondissement Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension.

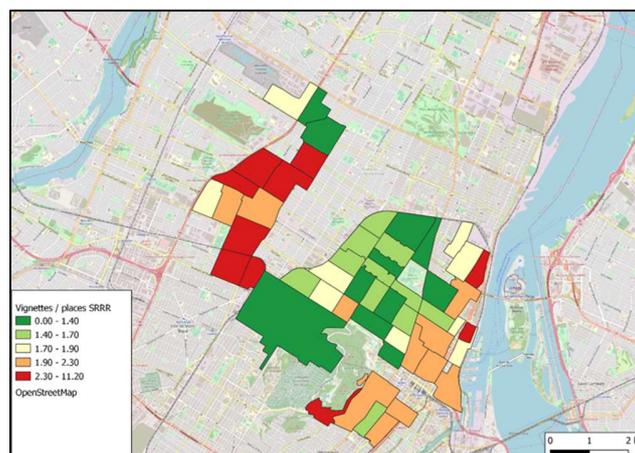


Figure 2-46 Utilisation des zones de stationnement sur rue réservé aux résidents (SRRR) le lundi 9 mai 2022 à 20h00

2.11.4 Conclusion

En conclusion, la présente recherche visait à développer un outil d'analyse automatisée du stationnement sur rue. Pour ce faire, plusieurs sources de données ouvertes ont été utilisées. Une codification des panneaux de stationnement a été effectuée. La source de données centrale est la géobase double, avec laquelle le référencement linéaire a pu être effectué. La méthodologie de création des zones a été décrite à l'aide d'un logigramme de détermination du sens de codification des flèches inscrites sur les panneaux de stationnement ainsi qu'un logigramme de création des zones de stationnement. Ensuite, deux exemples de résultats produits avec l'outil sont présentés. Premièrement, une quantification des interstices de stationnement est effectuée. Celle-ci montre qu'il est préférable d'avoir des véhicules de longueur variable puisque cela aura comme conséquence de réduire la longueur moyenne et totale des interstices. Ensuite, l'utilisation des zones de stationnement sur rue réservé aux résidents (SRRR) est analysée en comparant le nombre de vignettes émises par zone avec le nombre de places SRRR. Il est possible de constater une grande variabilité à travers les zones pour ce qui est du ratio vignettes/places.

Plusieurs limites doivent être soulignées. Premièrement, seules des données ouvertes ont été utilisées afin de créer l'outil d'analyse automatisée du stationnement. Cela fait en sorte que l'outil peut négliger certains éléments qui peuvent modifier la disponibilité du stationnement sur rue,

par exemple les permis d'occupation du domaine public qui ne sont pas disponibles en données ouvertes. Ensuite, la qualité des données joue aussi un rôle sur la qualité des estimations produites par l'outil. Cette qualité des données s'exprime par l'exactitude des données, leur exhaustivité ainsi que leur actualité.

2.12 Abordabilité intégrée transport-habitation

- Par : Brigitte Milord, M.Sc. Économie, professionnelle de recherche
- Contexte : Chaire Mobilité

2.12.1 Introduction

Chaque année, des milliers de ménages quittent les grands centres pour s'établir en périphérie en quête d'un logement abordable (Burnley et al., 1997; Statistique Canada, 2014). Dans un marché où l'offre immobilière se contracte, où les prix hypothécaires sont en surchauffe et où les conditions d'accès à la propriété deviennent plus sévères, les ménages peuvent encore davantage être incités à chercher un logement éloigné de leurs principaux lieux d'activité (Banque Scotia, 2021; Mastroianni, 2020). Cette pratique est connue sous le nom de « *drive until you qualify* ». Si cet éloignement permet de réduire les coûts d'habitation, il se traduit néanmoins par une augmentation des coûts de transport, en particulier dans les quartiers dépendant de l'automobile. La méconnaissance des coûts privés et collectifs associés aux localisations résidentielles semble favoriser des prises de décisions contraires à la fois aux objectifs des ménages, qui cherchent à améliorer leur santé financière, mais également aux objectifs de la société, qui cherche à réduire l'étalement urbain et ses conséquences environnementales, sociales et économiques. Les recherches avaient pour objectif de produire une synthèse des connaissances sur les interactions économiques entre le transport et l'habitation.

2.12.2 Méthodologie

La synthèse de connaissances repose sur une revue exploratoire (*scoping review*) de 165 documents de la littérature scientifique et de la littérature grise obtenus au moyen de méthodes de collecte automatique et manuelle. Les revues exploratoires permettent de répertorier efficacement et à faible coût les thématiques principales d'un objet de recherche dont les limites conceptuelles sont mal définies (Arksey & O'Malley, 2005).

Les composantes centrales, « habitation », « transport » « abordabilité », ont servi à développer une grille de mots-clés à partir de laquelle des équations de recherche ont été développées. Les mots-clés sont ensuite ajoutés un à un pour chacune des composantes afin d'établir leur impact et leur valeur ajoutée à la recherche. Les mots-clés ne générant aucun ou un très grand volume (>250) de résultats sont jugés peu contributifs à la recherche.

La chaîne réduite prend ainsi la forme suivante :

(hous) AND (transport*) AND (affordab*)*

L'équation complète prend la forme suivante :

(hous OR location* OR residen* OR dwelling* OR domicile* OR estate OR mortgage) AND (transport* OR transit OR automobile OR car) AND (affordab* OR expens* OR pric* OR budget* OR spendin* OR expenditure* OR cost*)*

Les résultats sont présentés à la Figure 2-47. Les bases de données Compendex et Web of Science (WoS), spécialisées dans la littérature scientifique technique en génie, ont été utilisées pour déterminer la valeur ajoutée des mots-clés pour la littérature en anglais. Un test sur la base de données Cairn a également été réalisé pour la littérature en français. Les termes économiques, en particulier « budget », « dépenses » et « coûts » génèrent d'importants volumes de résultats et indiquent l'étendue de la littérature se trouvant à la jonction du transport, de l'habitation et de l'économie.

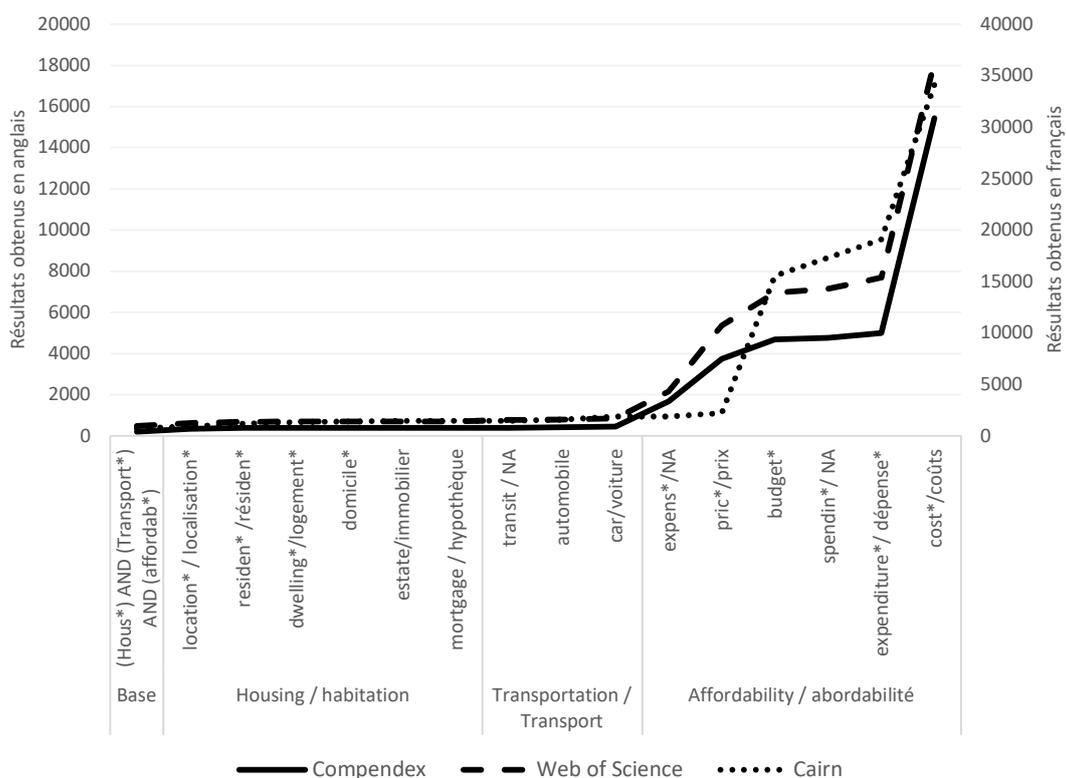


Figure 2-47: Profils d'accumulation des résultats obtenus par l'ajout de mots-clés

À la lumière des volumes de résultats et d'une analyse préliminaire du contenu basée sur les titres et les résumés des documents, il a été choisi d'opter pour trois méthodes de recherche. 1) La chaîne réduite a été recherchée de manière automatique dans le titre, le résumé et les mots-clés pour les bases de données Compendex et WoS; cette méthode a généré en tout 681 résultats. 2) La chaîne de mots-clés complète a été recherchée de manière automatique dans le titre uniquement pour les deux mêmes bases de données. Cette seconde méthode de recherche a généré 334 résultats supplémentaires. 3) Finalement une collecte manuelle a été effectuée dans les autres bases de données (TRID, JSTOR, Cairn, Sofia/WorldCat) ainsi que sur la base des références citées dans les documents collectés automatiquement. La revue exploratoire de la littérature grise repose sur les résultats du moteur de recherche Google. Les mots-clés utilisés sont les mêmes que pour la littérature scientifique. La recherche se limite aux documents en format PDF (« filetype : ») et publiés sur des domaines officiels (« Site : »).

Les données ont été nettoyées et analysées au moyen du logiciel libre Ryyan. Au total, 1016 résultats ont été obtenus au moyen de la méthode de collecte automatique, dont 717 (70 %) sur la base de données WoS et 299 (30 %) sur Compendex. Les doublons (239 résultats, 23,5 %) et les enregistrements ne répondant pas aux critères d'inclusion (636 résultats, 62,5 %) ont été retirés de la base de données. La pertinence des articles a été évaluée par une évaluation des titres et des résumés (*abstract*). Les articles retirés avaient au moins une des trois composantes de recherche manquante.

2.12.3 Résultats

2.12.3.1 Définitions de l'abordabilité

Les indicateurs d'abordabilité intégrée transport et habitation sont largement influencés par les indicateurs classiques de l'abordabilité en matière de logement. Il n'existe pas de consensus à l'échelle internationale sur la façon de définir et de mesurer l'abordabilité du logement (OCDE, 2021). Ce constat s'explique par le fait que l'abordabilité comporte de nombreuses facettes. Il existe à ce jour quatre grandes familles d'indicateurs.

État du marché

Cette famille d'indicateurs mesure l'abordabilité relativement à la distribution des prix sur le marché. Selon le programme AccèsLogis au Québec, pour être abordables, les loyers ne peuvent être supérieurs à 95 % des loyers médians de la région (Ville de Montréal, 2020a, 2020b, 2019). Les banques mesurent l'abordabilité de l'accession à la propriété en comparant le paiement hypothécaire mensuel moyen au loyer mensuel moyen (Banque Nationale, 2021). Cette famille d'indicateurs a pour désavantage de ne pas tenir compte de la capacité de payer des ménages.

Effort budgétaire

L'effort en matière d'habitation est classiquement mesuré par le ratio suivant :

$$\text{Seuil d'abordabilité} \geq \frac{\text{Montant d'argent consacré à l'habitation}}{\text{Revenu du ménage}}$$

Il s'agit de l'indicateur le plus largement répandu à travers le monde. Il est utilisé pour identifier les problèmes d'abordabilité sur différents marchés (locatif, propriété, copropriété, régionaux), ainsi que pour évaluer l'éligibilité des personnes ou des projets immobiliers aux programmes de prêts ou de subventions (Stone, 2006).

Le montant d'argent consacré à l'habitation peut inclure uniquement les frais directs de l'habitation (c'est-à-dire les loyers ou les paiements hypothécaires) ou englober les frais indirects de l'habitation (ex. chauffage, taxes municipales) de manière à refléter le poids réel de l'habitation dans les dépenses des ménages. Il n'existe pas de consensus international sur la façon de définir les frais indirects, bien que les institutions internationales aient entrepris d'importantes initiatives pour harmoniser les définitions et les indicateurs ces dernières années (OCDE, Eurostat, OIT, FMI, BM, CEENU, 2013).

Le revenu du ménage peut lui aussi être calculé de différentes façons (moyen ou médian, avant ou après impôt) selon l'objectif poursuivi. Il n'existe pas non plus de consensus sur la manière de comptabiliser le revenu des ménages.

Cette méthode nécessite finalement de définir un seuil au-delà duquel le poids financier de l'habitation dans les dépenses des ménages est jugé excessif. Dans les années 1940, le gouvernement américain fixe à 20 % du revenu d'un ménage le seuil d'abordabilité pour les logements sociaux. Ce seuil passera à 25 % du revenu en 1969, puis à 30 % en 1981 (U.S. Department of Housing, 2017). Le seuil de 30 % deviendra progressivement une règle de pouce aux États-Unis, mais aussi un peu partout dans le monde, autant sur le marché de la location que de la propriété (OCDE, 2021).

Le choix d'un seuil pour évaluer le rapport coût-revenu, qu'il soit établi à 25 % ou 40 %, demeure néanmoins arbitraire. Par ailleurs, ce ratio ne tient pas compte explicitement de la capacité des ménages à se procurer des biens et services essentiels.

Revenu résiduel

Cette approche part du constat qu'un ménage à faible revenu qui dépense 20 % de son revenu pour son logement n'aura pas les mêmes moyens financiers résiduels qu'un ménage aisé qui fournit le même niveau d'effort budgétaire (OCDE, 2021). Il s'agit d'une famille d'indicateurs encore relativement récents. En 2020, la SCHL et Statistique Canada ont introduit pour la première fois le concept de « difficulté de logement » (SCHL, 2020). Pour quantifier les frais de subsistance, la mesure du panier de consommation (MPC) est utilisée. Celle-ci permet d'établir des seuils de pauvreté en fonction du coût d'un panier de biens et services essentiels pour un ménage modeste. Il est néanmoins difficile de mesurer adéquatement le revenu nécessaire à un ménage, notamment parce que la MPC ne tient pas compte des opportunités locales réelles. Cet indicateur ne dit par ailleurs rien sur la qualité des logements.

Besoins impérieux

En raison des contraintes financières qui les accablent, les ménages à faible revenu doivent parfois accepter des conditions de logement inadéquates. Les indicateurs de la qualité du logement permettent de tenir compte des caractéristiques et des conditions de logement auxquelles les ménages ont accès en échange d'un montant d'argent ou d'un effort budgétaire donné. On mesure typiquement la qualité d'un logement par l'espace disponible (ex. nombre de chambres) ou les déficits d'entretien (ex. infiltrations d'eau, moisissures) (OCDE, 2021). Cette approche se limite cependant à révéler les déficits internes des logements et ne dit rien sur l'environnement extérieur (ex. accessibilité en transport, accessibilité alimentaire, niveau de pollution).

Angles morts de l'abordabilité

Plusieurs autres facettes de l'abordabilité sont encore négligées par les indicateurs classiques et la littérature scientifique demeure pour le moment relativement silencieuse sur ces sujets :

- **Abordabilité de long terme** : contrairement aux locataires, les propriétaires capitalisent leurs frais d'habitation, leur assurant ainsi un revenu futur plus élevé. Le seuil d'abordabilité devrait donc logiquement être différent pour les locataires et les propriétaires.
- **Qualité de l'environnement** : les logements peu dispendieux sont souvent localisés dans des environnements peu intéressants (désert alimentaire, pollution atmosphérique, bruit, criminalité, etc.) (Dube et al., 2017; Gluszak, 2018). La perte de bien-être qui accompagne ces localisations n'est pas comptabilisée par les indicateurs.
- **Qualité des alternatives à l'automobile** : accessibilité des zones d'emplois, compétitivité vis-à-vis de l'automobile, alternative en cas de panne de l'alternative principale.
- **Externalités** : les coûts sociaux qui accompagnent les choix de localisations (destruction des milieux naturels et agricoles, accidents routiers, congestion).
- **Taille des logements** : certains ménages qui semblent présenter des enjeux d'abordabilité au regard de leur effort budgétaire résident parfois dans des logements trop grands pour leurs besoins réels (Stone, 2006). Aux États-Unis, la superficie moyenne des maisons est passée de 1 660 à 2 687 pieds carrés (+62 %) entre 1973 et 2015 (U.S. Department of Commerce, 2015).

Finalement il est important de souligner que standards de logements, de même que les perspectives sur leur abordabilité, varient significativement dans le temps et l'espace. À titre d'exemple, la satisfaction à l'égard du logement tend à être relativement plus élevée dans les pays

nordiques alors que ces derniers consacrent une part relativement plus grande de leurs revenus à l'habitation (OCDE, 2021). Puisque l'abordabilité comporte une part de subjectivité, il serait ainsi vain de tenter d'établir une mesure normative (Schiller, 2007). Les contraintes financières sont néanmoins des réalités bien tangibles pour les personnes à faible revenu et il serait néanmoins possible d'établir des seuils d'abordabilité avec des propriétés objectives (Stone, 2006).

2.12.3.2 Relation entre les localisations résidentielles et les coûts de transports

L'arbitrage entre les dépenses de transport et d'habitation est un phénomène connu depuis les années 1960 (Alonso, 1964; Brueckner, 1987; Hansen, 1959; Muth, 1969). Un déménagement n'affecte pas uniquement les trajets entre le domicile et le travail, mais l'ensemble des habitudes de transport d'un ménage (Saberri et al., 2017). Dans les quartiers où il n'existe pas d'alternative à l'automobile, il est souvent impossible de se rendre à l'épicerie, à la garderie ou au dépanneur sans voiture. La somme de tous ces petits déplacements quotidiens augmente les coûts d'utilisation, mais peut également motiver l'achat d'un véhicule supplémentaire. La décision d'acquérir un nouveau véhicule, en particulier neuf, n'est pas sans conséquence financière puisque les coûts fixes (ex. dépréciation, frais de financement, assurances) représentent 60% des coûts totaux d'un véhicule neuf (CAA, 2020; CNT, 2003; Pembina, 2012). Au Québec, les ménages propriétaires avec une hypothèque ont dépensé 13 605\$ en transport, comparativement à 6 489\$ pour les ménages locataires en 2017 (ISQ, 2019). Certains auteurs estiment ainsi que l'éloignement n'est pas rentable et que la définition de l'abordabilité devrait inclure les dépenses de transport afin de témoigner explicitement de ces arbitrages (CNT, 2009; Dewita et al., 2018; Haines and Burda, 2012; Isalou et al., 2014; Saberri et al., 2017). Une redéfinition de l'abordabilité permettrait aux ménages, aux promoteurs ainsi qu'aux administrations publiques d'effectuer de meilleurs choix de localisation et d'investissement et ainsi de contrer l'étalement urbain et la motorisation des ménages.

2.12.3.3 Perspectives économiques des choix de localisations résidentielles

Si l'éloignement n'est pas nécessairement rentable sur le plan financier, pourquoi les ménages font-ils ce choix ? La théorie économique fournit quelques pistes de réflexion à cet égard.

Problématique d'information – méconnaissance des coûts de transport

L'économie considère que l'information est une condition essentielle à une prise de décisions éclairée (Stiglitz et al., 2007). Or, l'estimation des coûts de transport est un exercice relativement complexe, en particulier en ce qui a trait à l'automobile. Tout d'abord parce qu'il implique une multitude de déboursés (ex. remboursements du prêt automobile, ajout de carburant, changement de pneus) à différents moments dans le temps. Ensuite parce qu'il nécessite la maîtrise de notions financières relativement avancées (ex. taux d'intérêt, dépréciation). Finalement, sous une perspective de long terme, les estimations des coûts de transport comportent une bonne dose d'incertitude en raison des fluctuations des taux d'intérêt et du prix de l'essence, mais également des coûts d'entretien, de réparation, de dépréciation et de changement de véhicules (Burnham et al., 2021; DOT and HUD, 2012). Il n'est ainsi pas surprenant de constater que, sur les plans strictement financier et privé, quatre Canadiens sur cinq sous-estiment les coûts de possession et d'utilisation de leur véhicule (CAA, 2013; CAA Québec, 2013). Cela est sans doute encore plus vrai au moment d'un déménagement qui vient modifier toutes les chaînes de déplacements et les besoins de motorisation. Certains résultats empiriques en matière d'abordabilité intégrée indiquent que les économies réalisées en transport ne seraient pas toujours suffisantes pour compenser l'accroissement des coûts d'habitation dans les milieux urbains et denses (Liu et al., 2021; SCHL, 2019; Schouten, 2021; Smart and Klein, 2018). Certaines de ces études tendent cependant à négliger des dépenses de transport dans leurs calculs.

Externalités – coûts collectifs de l'étalement urbain

Une externalité est une situation où un individu ou une entreprise ne supporte pas pleinement les coûts rattachés à son action (Stiglitz et al., 2007). Il en résulte que la demande, par exemple pour des logements éloignés, est plus élevée que ce qui serait collectivement souhaitable. Plusieurs études s'intéressent aux externalités en transports (European Commission, 2019; Ossokina and Verweij, 2015; Petruccelli and Supino, 2015). Les recherches empiriques s'intéressent de plus en plus aux coûts associés à la destruction des milieux naturels (OCDE, 2019). Dans ces études, l'étalement urbain est souvent répertorié parmi les facteurs contributifs, mais aucune étude ne porte spécifiquement sur le choix des localisations.

Contraintes financières

Les institutions financières utilisent différents ratios pour évaluer l'admissibilité à un prêt hypothécaire. Le rapport d'amortissement brut de la dette (ABD), qui estime le rapport des dépenses de logement (versement hypothécaire, frais de chauffage, impôts fonciers) sur le revenu brut (avant impôts) des ménages, ne doit ainsi pas excéder 32 % pour que l'emprunteur soit jugé admissible à un prêt hypothécaire. Le rapport d'amortissement total de la dette (ATD), qui tient quant à lui compte des paiements de cartes de crédit, de marges de crédit, de paiements automobiles et d'autres dettes au moment d'effectuer la demande de prêts, ne doit pas excéder 40 % (ACFC, 2022). Ainsi, même en étant pleinement conscient des coûts privés et collectifs de transport qui découlent de leur choix de localisation, il est possible que les ménages, les entreprises et les promoteurs demeurent contraints de s'éloigner (Andrews and Sánchez, 2011).

Distorsions publiques

Les sections précédentes traitent des défaillances de marché, soit les situations où le marché laissé à lui-même tend à produire des résultats collectivement inefficaces en raison d'externalités ou de problématique d'information par exemple. Ces situations justifient habituellement l'intervention de l'État. Les gouvernements encouragent cependant eux-mêmes l'étalement urbain et la dépendance à l'automobile de différentes façons. Tout d'abord par des programmes d'accession à la propriété et des programmes de construction de logements abordables qui ne tiennent pas compte de la localisation des propriétés. Ensuite, en soutenant le réseau routier au détriment du transport en commun, ce qui réduit la compétitivité des transports collectifs et actifs, mais augmente également la consommation du territoire (Wassmer, 2008). Aussi, les gouvernements tendent à intervenir de manière insuffisante vis-à-vis des externalités (ex. congestion, destruction des milieux naturels). Finalement, les gouvernements ne tiennent pas compte de la demande induite de transport et d'habitation qui accompagne leurs décisions (ex. construction d'une route, localisation d'un bâtiment public comme une école, etc.).

2.12.3.4 Applications du concept d'abordabilité intégrée

Les recherches ont permis d'identifier différentes méthodes et outils associés au concept d'abordabilité intégrée transport et habitation.

Indicateur d'effort budgétaire intégré

Reprenant le concept d'effort budgétaire, certains auteurs ajoutent aux frais indirects les dépenses de transport. Aux États-Unis, le *Center for Neighborhood Technologies* recommande un seuil d'effort budgétaire de 45 % (*H+T Affordability Index*) (CNT, 2020). Plusieurs études scientifiques ont découlé de cette suggestion. Haines and Burda (2012) montrent que les localisations au centre-ville peuvent être plus abordables que la périphérie en tenant compte des frais de transport à Toronto. Liu et al. (2021) montrent que, lorsque seuls les coûts de TC sont

considérés, la banlieue est plus abordable à Chicago. Saberi et al. (2017) soulignent l'importance de tenir compte des coûts de possession ainsi que de toutes les activités, non pas uniquement le trajet domicile-travail à Sydney (Australie). Dewita et al. (2018) dérivent une frontière d'efficacité (capacité de réaliser des déplacements à moindre coût) à travers l'espace selon les modes de transports accessibles, le mode d'occupation des logements et la typologie des ménages. Malgré l'ajout des dépenses de transport, ces analyses demeurent sujettes aux limites conceptuelles précédemment mentionnées.

Indicateur de vulnérabilité financière

La fluctuation des grands agrégats économiques (ex. salaires, taux d'intérêt, prix de l'essence, inflation) peut vulnérabiliser les ménages. Sur le marché immobilier, les banques procèdent à des tests de résistance d'emprunt hypothécaire afin d'assurer que les ménages auront les ressources financières nécessaires pour absorber une hausse des taux hypothécaires si une telle situation devait se produire (Canada, 2023). Inspirés par ces tests, Dodson and Sipe (2006) proposent notamment un indicateur intitulé *Vulnerability Index for Petrol Expense Rises* (VIPER). Cet indicateur mesure, pour chacun des secteurs de recensement, l'exposition des ménages à des circonstances économiques. Cao and Hickman (2018) proposent un indicateur intitulé, *Car Dependence and Housing Affordability* (CDHA) qui révèlent les secteurs les plus vulnérables de Londres sur la base de la possession et de l'utilisation de l'automobile.

Rentabilité financière

L'indicateur d'effort budgétaire mesure la capacité financière d'un ménage à équilibrer son budget à court terme, mais ne dit rien sur la rentabilité financière à long terme d'une décision de localisation. Rappelant qu'un véhicule est un bien de consommation et non pas un investissement, certains auteurs ont démontré qu'un ménage peut s'enrichir s'il troque un véhicule automobile pour un véhicule d'investissement comme l'immobilier (Haines and Burda, 2012; Litman, 2021). La littérature sur ce sujet est encore embryonnaire.

Calculateurs

Certaines plateformes émergent pour pallier les problématiques d'information. Le *Location Affordability Index* (LAI), développé par le département américain de l'habitation (HUD), présente différentes mesures d'abordabilité adaptées pour huit profils de ménages. Dans la région de Seattle, le projet *Right size Parking* vise à sensibiliser les promoteurs immobiliers, les décideurs et les ménages sur le fait que les stationnements peuvent représenter de 10 à 20 % du coût d'un logement. Conséquemment, construire un nombre excessif de stationnements, notamment sous la contrainte des ratios imposés par les municipalités, peut nuire à l'abordabilité des logements (King County Metro, 2015).

Crédit hypothécaire adossé au transport

S'attaquant à la problématique de contrainte financière, le concept de *Location efficient mortgage* vise à développer une méthodologie qui permette aux banques d'accorder un prêt hypothécaire plus élevé en contrepartie des économies qui pourraient être réalisées en transport (CNT, 2009). Les premiers projets pilotes n'ont pas été fructueux en raison de la difficulté de l'époque à estimer les économies ainsi que d'un manque d'enthousiasme de la part des prêteurs (Blackman and Krupnick, 2001; Chatman and Voorhoeve, 2010). Le contexte actuel pourrait peut-être être plus propice à l'émergence d'un tel outil.

2.12.4 Conclusion

Il n'existe pas de consensus sur la manière de définir et de mesurer l'abordabilité dans ses multiples facettes. Chose certaine, la conception que les ménages, les entreprises et les décideurs en ont exclue largement les dépenses de transport, bien que les arbitrages entre les coûts de transport et d'habitation soient connus depuis les années 1960. La prise de conscience de l'ampleur des coûts privés et sociaux qui accompagnent l'étalement urbain favorise, lentement mais sûrement, l'émergence d'indicateurs, de méthodes et d'outils. Ces applications visent à corriger certaines des défaillances qui favorisent l'étalement urbain, notamment la méconnaissance des coûts de transport et les contraintes financières. Cette littérature en est encore à ses balbutiements et les perspectives de recherche sont grandes :

- Les méthodes de calculs des coûts de transport associés à des localisations résidentielles précises sont pour le moment encore rudimentaires et ce principalement en raison d'un manque de données sur les habitudes de mobilité des ménages et les coûts des véhicules. De telles données pourraient permettre de développer des calculateurs plus performants et ainsi aider les ménages à prendre de meilleures décisions.
- Les applications n'intègrent pas encore les coûts collectifs des localisations résidentielles (ex. congestion, destruction des milieux naturels). Des indicateurs et des méthodes doivent être développés. La quantification des coûts sociaux pourrait elle aussi entraîner une prise de conscience.
- Plusieurs facettes de l'abordabilité sont encore négligées. Les applications sont pour le moment largement limitées à une perspective de court terme. Les enjeux de vulnérabilité et de rentabilité financière à long terme demeurent peu étudiés, tout comme la qualité de l'environnement et des alternatives de transport autour du domicile.
- Les avancés scientifiques doivent finalement être intégrées aux modèles de planification (ex. LUTI) afin de prévoir en amont les conditions qui favoriseront une abordabilité relativement plus pérenne.
- Le rôle des gouvernements dans la poursuite de l'étalement urbain, à travers les plans, les politiques et les programmes de financement qui touchent le transport et l'habitation, doit finalement être étudié.

2.13 Transition : état d'avancement du développement

- Par : Pierre-Léo Bourbonnais et Geneviève Bastien, professionnels de recherche
- Contexte : Projet Transition – CRSNG, InnovÉE, exo, STM, STL, STO, STS, RTL, MTMD

Au cours de la dernière année, des efforts significatifs ont été consacrés au développement et à l'amélioration de la plateforme Transition, avec un accent particulier mis sur l'efficacité, la facilité d'utilisation et l'accessibilité. Il est fortement espéré que ces améliorations aideront les utilisateurs et les partenaires. Voici un aperçu des principales avancées réalisées :

1. Application open source sur GitHub

Transition est désormais un projet open source, accessible à tous sur GitHub. Cela permet à la communauté de développeurs de contribuer au projet, augmentant ainsi son potentiel de croissance et d'amélioration.

2. Amélioration de l'import de GTFS

Des améliorations significatives ont été apportées à l'importation de données GTFS. Ces améliorations ont permis d'augmenter la stabilité du processus d'importation et la convivialité pour l'utilisateur.

3. Gestion des tâches de calcul

La gestion des tâches de calcul a été améliorée, avec l'ajout d'une fonctionnalité d'exécution en arrière-plan. Les utilisateurs peuvent également annuler l'exécution de ces tâches si nécessaire, ce qui améliore grandement la flexibilité et la convivialité des calculs.

4. Amélioration de la simulation par algorithme génétique

L'algorithme de simulation génétique a été réarchitecturé pour supporter une fonction de coûts des réseaux par trajets OD ou par accessibilité aux services. Cela rend la simulation plus précise et permet des analyses plus détaillées.

5. Import des lieux d'activités à partir d'OpenStreetMap

La fonctionnalité d'importation des lieux d'activités à partir d'OpenStreetMap a été ajoutée. Si présents, ces lieux sont inclus dans les statistiques des cartes d'accessibilité, fournissant ainsi des informations plus précises et permettant de considérer et de comparer l'attractivité des zones desservies.

6. Nettoyage de l'API de trRouting

L'équipe de développement a travaillé à nettoyer l'API de trRouting (module de calculs de chemin de transport collectif intégré dans Transition), pour améliorer son efficacité et faciliter son utilisation. Les utilisateurs peuvent désormais bénéficier d'une API plus claire et plus performante.

7. Amélioration de la robustesse de l'application

Une meilleure gestion des cas multi-utilisateurs augmente la robustesse et la fiabilité de l'application. Plusieurs bugs ont aussi été corrigés et ont permis d'améliorer l'expérience utilisateur.

9. Amélioration de la documentation d'installation

La documentation d'installation a été également mise à jour pour faciliter le processus de mise en route de l'application. Il est désormais possible d'installer l'application en utilisant Docker, ce qui simplifie considérablement la procédure d'installation. De plus, des instructions détaillées ont été ajoutées pour l'installation locale sur MacOS et sur Ubuntu/Debian. Ces améliorations rendent l'application accessible à un public plus large de développeurs.

L'équipe de développement du projet Transition a mis un point d'honneur à rendre l'outil plus accessible, plus performant et plus facile à utiliser, tout en continuant à corriger les erreurs et à ajouter des fonctionnalités en réponse aux besoins de la communauté et des partenaires. Les partenaires ont aussi collaboré au développement par leur retour sur expérience, soit par courriel, soit via la plateforme GitHub, soit en discutant en personne lors de périodes informelles de discussion et formation.

L'adoption d'un modèle open source accessible à tous sur GitHub représente une étape significative, permettant à une communauté plus large de contribuer au développement et à l'amélioration de l'outil.

En conclusion, le projet Transition a connu des avancées significatives sur plusieurs fronts. L'équipe de développement reste déterminée à améliorer encore l'outil pour atteindre son plein potentiel en tant qu'outil de planification du transport collectif.

Cette section a été rédigée avec l'aide de ChatGPT-4, un modèle de langage avancé développé par OpenAI.

Références : [trRouting \(GitHub\)](#), [transition \(GitHub\)](#).

3 Rayonnement

Les activités de l'année 2022 de l'équipe de la Chaire Mobilité sont listées ci-dessous.

3.1 Publications (2022)

Garnier, C., Trépanier, M., Morency, C. (2022). An algorithm based on the Canadian survey on disability to propose paratransit eligibility of the Quebec's population, *Journal of Transport & Health* 27, 101512.

Khachman, M., Morency, C., Ciari, F. (2022). Integrated multiresolution framework for spatialized population synthesis, *Transportation*, 1-30.

Laviolette, J., Morency, C., Waygood, EOD (2022). A kilometer or a mile? Does buffer size matter when it comes to car ownership? *Journal of Transport Geography* 104, 103456

Deschaintres, E., Morency, C., Trépanier, M. (2022). 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.

C Garnier, M Trépanier, C Morency (2022). Criteria to prioritize opportunities to shift paratransit trips to regular transit network—Montreal case study, *Journal of Transport & Health* 24, 101338.

J Laviolette, C Morency, OD Waygood, KG Goulias (2022). Car ownership and the built environment: a spatial modeling approach, *Transportation research record* 2676 (3), 125-141

A Mehdizadeh Dastjerdi, C Morency (2022). Bike-sharing demand prediction at community level under COVID-19 using deep learning, *Sensors* 22 (3), 1060

E Deschaintres, C Morency, M Trépanier (2022). 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*.

C Morency, FR Tremblay-Racicot, B Milord (2022). L'abordabilité intégrée des localisations résidentielles: état des connaissances scientifiques, des données, des indicateurs et des outils, CIRRELT-2022-06.pdf, Université de Montréal.

M Trépanier, C Morency, V Francoeur, B Milord, P Levesque (2022). Les carrefours intelligents de mobilité: état des connaissances scientifiques et études de cas, cirreлт-2022-04.pdf, Université de Montreal

3.2 Principales participations à des congrès

3.2.1 Congrès annuel du Transportation Research Board 2022

Arefin Khan, N., Morency, C. (2022). Investigating Anticipated Changes in Travel Behavior after COVID-19: A Latent Segmentation-based Logit Modeling Approach, 101th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC.

Laviolette, J., Morency, C., Waygood, E.O.D. (2022). A Kilometer or a Mile?: Does Buffer Size Matter When It Comes to Car Ownership, 101th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC.

Alizadeh, H., Morency, C., Trépanier, M. (2022). Modeling Long-Distance Travel Demand Using a Rare Event Modeling Approach, 101th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC.

Deschaintres, E., Morency, C., Trépanier, M. (2022). Assessing the Impacts of the COVID-19 Pandemic on Subway Ridership and Interactions with Other Transportation Modes, 101th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC.

3.2.2 Congrès annuel de l'AQTR 2022

Morency, C. (2022). L'obésité spatiale dans tous ses états, présenté au 56^e congrès de l'Association québécoise des transports, Laval.

Deschaintres, E., Morency, C., Trépanier, M. (2022). Les différentes phases de la pandémie de COVID-19 : analyse croisée des impacts sur plusieurs modes de transport, présenté au 56^e congrès de l'Association québécoise des transports, Laval.

Malekzadeh, H., Morency, C. (2022). Modélisation des Comportements Projetés Post-COVID (avec Enquêtes COVID 2020, 2021) et Scénarios Plausibles Post-COVID, présenté au 56^e congrès de l'Association québécoise des transports, Laval.

Laviolette, J., Morency, C., Waygood, E.O.D. (2022). Métro, bus, densité, autopartage, commerces locaux : qu'est-ce qui réduit la motorisation des ménages?, présenté au 56^e congrès de l'Association québécoise des transports, Laval.

Garnier, C., Trépanier, M., Morency, C. (2022). Du transport adapté vers le réseau régulier, présenté au 56^e congrès de l'Association québécoise des transports, Laval.

3.2.3 CTRF 2022 (Canadian Transport Research Forum)

Ali Zadeh, H., Morency, C., Trépanier, M. (2022). Mode Competitiveness Analysis of Interregional Corridors in Province of Quebec, 57th Annual CTRF Conference, Montreal, QC.

Laviolette, J., Morency, C., Trépanier, M. (2022). Does the Built Environment at Home and Work Locations Affect the Willingness to Reduce Car Use for Commuting?, 57th Annual CTRF Conference, Montreal, QC.

Chekir, E., Morency, C. (2022). « Don't Beat Around the Bush" to get to the Metro!, 57th Annual CTRF Conference, Montreal, QC.

3.2.4 NARSC 2022 (69th North American Meetings of the Regional Science Association International)

Bourdeau, J.-S., Morency, C. (2022). Automated analysis of on-street parking, NARSC 2022, Montreal

Murray, D., Morency, C. (2022). A methodology for generating multimodal transportation networks, NARSC 2022, Montreal.

3.2.5 ISCTSC 2022 (Transport Survey Methods Conference)

Verreault, H., Morency, C. (2022). Multi-frame sampling in households travel survey: a Montreal case study, 12th International Conference on Transport Survey Methods, Portugal.

Morency, C., Trépanier, M., Harding, C., Verreault, H., Bourbonnais, P.-L. (2022). Scenarios for a National Household Travel Survey in the Province of Quebec, 12th International Conference on Transport Survey Methods, Portugal.

Bourdeau, J.-S., Morency, C. (2022). Yearly patterns of transit usage: a cumulative clustering approach using 7 years of smart card data, 12th International Conference on Transport Survey Methods, Portugal.

4 Références

- Abele, L., Møller, & Mette. (2011). General rights The Relationship between Road Design and Driving Behavior. 3rd International Conference on Road Safety and Simulation, 17.
- Abkowitz, M., Engelstein, I., 1984. Methods for maintaining transit service regularity. *Transportation Research Record* 961, 1–8.
- ACFC, 2022. Outil d'évaluation d'admissibilité à un prêt hypothécaire. URL <https://itools-ioutils.fcac-acfc.gc.ca/MQ-HQ/MQCalc-EAPHCalc-fra.aspx?wbdisable=true>
- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE transactions on automatic control*, 19(6), 716-723.
- Alonso, W., 1964. *Location and Land Use: Toward a General Theory of Land Rent*, Harvard University Press. ed.
- Altmann, D. M., Douek, D. C., & Boyton, R. J. (2020). What policy makers need to know about COVID-19 protective immunity. *The Lancet*, 395(10236), 1527-1529.
- Andersen, C. S., & Reinau, K. H. (2016). The Relationship Between Road Characteristics And Speed Collected From Floating Car Data. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 4(6), 10. <https://doi.org/10.17265/2328-2142/2016.06.001>
- Andrews, D., Sánchez, C., 2011. *The Evolution of Homeownership Rates in Selected OECD Countries: Demographic and Public Policy Influences*. OCDE.
- Aronsson, K. F. M. (2006). *Speed characteristics of urban streets based on driver behaviour studies and simulation*. Division of transport och logistics, Royal Institute of Technology.
- Babić, D., Fiolić, M., Babić, D., & Gates, T. (2020). Road Markings and Their Impact on Driver Behaviour and Road Safety: A Systematic Review of Current Findings. In *Journal of Advanced Transportation* (Vol. 2020). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2020/7843743>
- Balcombe, R., Mackett, R., Paulley, N., Preston, J., Shires, J., Titheridge, H., Wardman, M., White, P., 2004. *The demand for public transport: a practical guide*. Transportation Research Laboratory.
- Banque Nationale, 2021. *Suivi de l'abordabilité du logement au T3 2021*.
- Banque Scotia, 2021. *Qu'est-ce que le test de résistance canadien pour les prêts hypothécaires?* Scotia Cons. URL <https://www.scotiabank.com/ca/fr/particuliers/conseils-plus/articles-de-fonds/posts.quest-ce-que-le-test-de-resistance.html>
- Ben-Akiva, M. E., Lerman, S. R., & Lerman, S. R. (1985). *Discrete choice analysis: theory and application to travel demand* (Vol. 9): MIT press.
- Ben-Bassat, T., & Shinar, D. (2011). Effect of shoulder width, guardrail and roadway geometry on driver perception and behavior. *Accident Analysis and Prevention*, 43(6), 2142–2152. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.06.004>
- Berdica, K. (2002). "An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done." *Transport policy* 9(2): 117-127.
- Berdica, K. and L.-G. Mattsson (2007). *Vulnerability: a model-based case study of the road network in Stockholm*. Critical infrastructure, Springer: 81-106.
- Bergman, L. R. and R. Brage (2008). "Survey experiences and later survey attitudes, intentions and behaviour." *Journal of Official Statistics* 24(1): 99.

- Bhaskar, A., Cools, M., Chung, E., et al., 2017. An investigation of timed transfer coordination using event-based multi agent simulation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 81, 363–378.
- Bierlaire, M. (2020). A short introduction to PandasBiogeme. A short introduction to PandasBiogeme.
- Blackman, A., Krupnick, A., 2001. Location-Efficient Mortgages: Is the Rationale Sound? *J. Policy Anal. Manage.* 20, 633–649.
- Bottone, M., et al. (2021). "Response Burden and Data Quality in Business Surveys." *Journal of Official Statistics* 37(4): 811-836.
- Bourbonnais, P.-L. and C. Morency (2018). "Factors affecting interview duration in web-based travel surveys." *Transportation Research Record* 2672(42): 33-44.
- 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.*
- Bourdeau, J.S. (2014). MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE AUTOMATISÉE DES STATIONNEMENTS. <https://publications.polymtl.ca/1529/>, 144 pages.
- Bradburn, N. (1978). Respondent burden. *Proceedings of the Survey Research Methods Section of the American Statistical Association, American Statistical Association Alexandria, VA, USA.*
- Briz-Redón, Á. (2021). "Respondent Burden Effects on Item Non-Response and Careless Response Rates: An Analysis of Two Types of Surveys." *Mathematics* 9(17): 2035.
- Brueckner, J., 1987. The structure of Urban Equilibria: A Unified Treatment of the Muth-Mills Models, in: *Handbook of Regional and Urban Economics*. Elsevier Science Publishers B.V.
- Brundell-Freij, K., & Ericsson, E. (2005). Influence of street characteristics, driver category and car performance on urban driving patterns. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 10(3), 213–229. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2005.01.001>
- Bucsky, P. (2020). Modal share changes due to COVID-19: The case of Budapest. *Transportation research interdisciplinary perspectives*, 8, 100141.
- Burnham, A., Gohlke, D., Rush, L., Stephens, T., 2021. Comprehensive Total Cost of Ownership Quantification for Vehicles with Different Size Classes and Powertrains. Argonne.
- Burnley, I.H., Murphy, P.A., Jenner, A., 1997. Selecting Suburbia: Residential Relocation to Outer Sydney. *Urban Stud.* 34, 1109–1127.
- CAA Québec, 2013. *Calculateur de coûts d'utilisation d'un véhicule : nouvel outil de CAA-Québec pour aider les automobilistes. Communiqué de presse, 25 février 2013 [WWW Document]. URL <https://www.caaquebec.com/fr/actualite/nouvelles/article/calculateur-de-couts-dutilisation-dun-vehicule-nouvel-outil-de-caa-quebec-pour-aider-les-automob/> (accessed 10.13.19).*
- CAA, 2013. *Coûts d'utilisation d'une automobile: Au-delà de l'étiquette de prix : Comprendre les dépenses liées au véhicule, Édition 2013.*
- CAA, 2020. *Driving Cost Calculator [WWW Document]. URL <https://coutsdutilisation.caa.ca/fr/> (accessed 12.4.20).*
- Canada, 2023. *Se préparer à obtenir une hypothèque. Agence de la consommation en matière financière du Canada.*

- Cao, M.Q., Hickman, R., 2018. Car dependence and housing affordability: An emerging social deprivation issue in London? *URBAN Stud.* 55, 2088–2105. <https://doi.org/10.1177/0042098017712682>
- Carlson, A., Hammarström, U., & Eriksson, O. (2013). Models and methods for the estimation of fuel consumption due to infrastructure parameters.
- Carrel, A., Halvorsen, A., Walker, J.L., 2013. Passengers' perception of and behavioral adaptation to unreliability in public transportation. *Transportation Research Record* 2351, 153–162.
- CDC, C. f. D. C. a. P. CDC Museum COVID-19 Timeline. Retrieved from <https://www.cdc.gov/museum/timeline/covid19.html>
- Chatman, D., Voorhoeve, N., 2010. The transportation-credit mortgage: a post-mortem. *Hous. POLICY DEBATE* 20, 355–382. <https://doi.org/10.1080/10511481003788786>
- Chen, C., Skabardonis, A., Varaiya, P., 2003. Travel-time reliability as a measure of service. *Transportation Research Record* 1855, 74–79.
- Chen, H., L. Zhang, Q. Liu, H. Wang and X. Dai (2021). "Simulation-based vulnerability assessment in transit systems with cascade failures." *Journal of Cleaner Production* 295: 126441.
- Chen, X., Cheng, Z., Jin, J.G., Trepanier, M., Sun, L., 2022. Probabilistic forecasting of bus travel time with a bayesian gaussian mixture model. *arXiv preprint arXiv:2206.06915* .
- Cheng, T., & Anbaroglu, B. (2010). Spatio-Temporal Clustering of Road Network Data.
- Cheung, G. W. and R. S. Lau (2008). "Testing mediation and suppression effects of latent variables: Bootstrapping with structural equation models." *Organizational research methods* 11(2): 296-325.
- Choi, J., Do Lee, W., Park, W. H., Kim, C., Choi, K., & Joh, C.-H. (2014). Analyzing changes in travel behavior in time and space using household travel surveys in Seoul Metropolitan Area over eight years. *Travel Behaviour and Society*, 1(1), 3-14.
- Chung, B., et al. (2021). "An inductive experimental approach to developing a web-based travel survey builder: developing guidelines to design an efficient web-survey platform." *Transportation Planning and Technology* 44(5): 487-502.
- CNT, 2003. Total Driving Costs. URL <https://htaindex.cnt.org/total-driving-costs/>
- CNT, 2009. Location Efficient Mortgages. URL <https://www.cnt.org/projects/rethinking-mortgages>
- CNT, 2020. H+T Index [WWW Document]. URL <https://htaindex.cnt.org/> (accessed 12.16.20).
- 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.
- Cover, T., Hart, P., 1967. Nearest neighbor pattern classification. *IEEE transactions on information theory* 13, 21–27.
- Crawford, S. D., et al. (2001). "Web Surveys:Perceptions of Burden." *Social Science Computer Review* 19(2): 146-162.

- Danaher, A., Wensley, J., Dunham, A., Orosz, T., Avery, R., Cobb, K., Watkins, K., Queen, C., Berrebi, S., Connor, M., et al., 2020. *Minutes Matter: A Bus Transit Service Reliability Guidebook*. Washington, DC: The National Academies Press. doi:<https://doi.org/10.17226/25727>.
- Daskalakis, N.G., Stathopoulos, A., 2008. Users' perceptive evaluation of bus arrival time deviations in stochastic networks. *Journal of Public Transportation* 11, 2.
- 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 Oliveira, E. L., L. da Silva Portugal and W. P. Junior (2016). "Indicators of reliability and vulnerability: Similarities and differences in ranking links of a complex road system." *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 88: 195-208.
- De Vos, J. (2020). The effect of COVID-19 and subsequent social distancing on travel behavior. *Transportation research interdisciplinary perspectives*, 5, 100121.
- D'este, G. a. and M. A. Taylor (2003). *Network vulnerability: an approach to reliability analysis at the level of national strategic transport networks*, Emerald Group Publishing Limited.
- Dewita, Y., Yen, B.T.H., Burke, M., 2018. The effect of transport cost on housing affordability: Experiences from the Bandung Metropolitan Area, Indonesia. *Land Use Policy* 79, 507–519. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.08.043>
- Dingil, A. E., & Esztergár-Kiss, D. (2021). The influence of the Covid-19 pandemic on mobility patterns: The first Wave's results. *Transportation Letters*, 13(5-6), 434-446.
- Dodson, J., Sipe, N., 2006. Oil Vulnerability in the Australian City: Assessing Socioeconomic Risks from Higher Urban Fuel Prices. *Urban Stud.* 44, 37–62. <https://doi.org/DOI:10.1080=00420980601023810>
- DOT, HUD, 2012. *Housing and Transportation Affordability Initiative: Understanding the Combined Cost of Housing and Transportation*.
- Dube, J., Legros, D., Theriault, M., Rosiers, F.D., 2017. Measuring and Interpreting Urban Externalities in Real-Estate Data: A Spatio-Temporal Difference-in-Differences (STDID) Estimator. *BUILDINGS* 7. <https://doi.org/10.3390/buildings7020051>
- Durkee, S. M. (2010). *The Effect Of Simulation Attributes On Driver Perception And Behavior*. Montana State University.
- Dykema, J., et al. (2013). "Surveying Clinicians by Web:Current Issues in Design and Administration." *Evaluation & the Health Professions* 36(3): 352-381.
- Ergin, M. E. (2022). *Evaluation of Different Phases of Covid-19 Pandemic using by Hybrid Approach Modeling*.
- Ericsson, E., Larsson, H., & Brundell-Freij, K. (2006). Optimizing route choice for lowest fuel consumption - Potential effects of a new driver support tool. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 14(6), 369–383. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2006.10.001>
- European Commission, 2019. *Handbook on the external costs of transport*.

- Fang, J., et al. (2012). "Participation willingness in web surveys: exploring effect of sponsoring corporation's and survey provider's reputation." *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking* 15(4): 195-199.
- Fatmi, M. R. (2020). COVID-19 impact on urban mobility. *Journal of Urban Management*, 9(3), 270-275.
- Ferreira, H., Rodrigues, C. M., & Pinho, C. (2019). Impact of road geometry on vehicle energy consumption and CO2 emissions: An energy-efficiency rating methodology. *Energies*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/en13010119>
- FHWA. (2013). Highway Functional Classification Concepts, Criteria and Procedures.
- Fisher, S. and L. Kydoniefs (2001). Using a theoretical model of response burden (RB) to identify sources of burden in surveys. 12th International Workshop on Household Survey Nonresponse, Oslo, Norway, September.
- Frankel, J. (1980). "Measurement of Respondent Burden: Study Design and Early Findings."
- Fricker, S., et al. (2012). An exploration of the application of PLS path modeling approach to creating a summary index of respondent burden. *JSM Proceedings*.
- Fricker, S., et al. (2014). Response burden: What predicts it and who is burdened out. *JSM proceedings*.
- Giesen, D. (2012). Exploring causes and effects of perceived response burden. Proceedings of the Fourth International Conference on Establishment Surveys (ICES IV), Montreal, Canada.
- Gluszak, M., 2018. Externalities and House Prices: A Stated Preferences Approach. *Entrep. Bus. Econ. Rev.* 6, 181–196. <https://doi.org/10.15678/EBER.2018.060410>
- Gonzalez, L. C., Moreno, R., Escalante, H. J., Martinez, F., & Carlos, M. R. (2017). Learning Roadway Surface Disruption Patterns Using the Bag of Words Representation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(11), 2916–2928. <https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2662483>
- Goralzik, A., & Vollrath, M. (2017). The effects of road, driver, and passenger presence on drivers' choice of speed: A driving simulator study. *Transportation Research Procedia*, 25, 2061–2075. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.400>
- Görizt, A. S. (2014). "Determinants of the starting rate and the completion rate in online panel studies1." *Online Panel Research: Data Quality Perspective*, A: 154-170.
- Groves, R. M., et al. (2004). "The role of topic interest in survey participation decisions." *Public opinion quarterly* 68(1): 2-31.
- Haines, G., Burda, C., 2012. Costs of Living and Commuting in the GTA: Case Study. Pembina.
- Hair, J. F. (2010). *Multivariate data analysis : a global perspective*. Upper Saddle River, N.J., Pearson Education.
- Hair, J. F. and B. J. Babin (2018). *Multivariate Data Analysis*, Cengage.
- Han, J., Kamber, M., & Pei, J. (2011). *Data Mining: Concepts and Techniques*.
- Hansen, W., 1959. How Accessibility Shapes Land Use. *J. Am. Inst. Plann.* 25, 73–76. <https://doi.org/10.1080/01944365908978307>

- Haraldsen, G. (2004). "Identifying and reducing response burdens in internet business surveys."
- Hartigan, J.A., Hartigan, P.M., 1985. The dip test of unimodality. *The annals of Statistics* , 70–84.
- Healthline. COVID-19 vs. SARS: How Do They Differ? Retrieved from <https://www.healthline.com/health/coronavirus-vs-sars#severity>
- Hensher, D. A. (2020). What might Covid-19 mean for mobility as a service (MaaS)? *Transport Reviews*, 40(5), 551-556.
- Ho, T.K., 1995. Random decision forests, in: *Proceedings of 3rd international conference on document analysis and recognition*, IEEE. pp.278–282.
- Hoogendoorn, A. W. (2004). "A questionnaire design for dependent interviewing that addresses the problem of cognitive satisficing." *Journal of Official Statistics* 20(2): 219.
- Hosmer Jr, D.W., Lemeshow, S., Sturdivant, R.X., 2013. *Applied logistic regression*. volume 398. John Wiley & Sons.
- Hu, L. t. and P. M. Bentler (1999). "Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives." *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal* 6(1): 1-55.
- Isalou, A.A., Litman, T., Shahmoradi, B., 2014. Testing the housing and transportation affordability index in a developing world context: A sustainability comparison of central and suburban districts in Qom, Iran. *Transp. Policy* 33, 33–39. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.02.006>
- ISQ, 2019. Dépenses moyennes des ménages et coefficients budgétaires, selon le poste de dépenses - Classification à 3 niveaux (73 catégories). URL <https://statistique.quebec.ca/fr/document/depenses-moyennes-des-menages-et-coefficients-budgetaires-selon-le-poste-de-depenses-classification-a-3-niveaux-73-categories>
- Itani, A. and A. Shalaby (2021). "Assessing the Bus Bridging Effectiveness on the Operational Resilience of the Subway Service in Toronto." *Transportation Research Record* 2675(9): 1410-1422.
- Jenelius, E. and L.-G. Mattsson (2012). "Road network vulnerability analysis of area-covering disruptions: A grid-based approach with case study." *Transportation research part A: policy and practice* 46(5): 746-760.
- Jenelius, E., T. Petersen and L.-G. Mattsson (2006). "Importance and exposure in road network vulnerability analysis." *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 40(7): 537-560.
- Keusch, F. (2015). "Why do people participate in Web surveys? Applying survey participation theory to Internet survey data collection." *Management review quarterly* 65(3): 183-216.
- Kieu, L.M., Bhaskar, A., Chung, E., 2015. Public transport travel time variability definitions and monitoring. *Journal of Transportation Engineering* 141, Article–number.
- Kim, K. (2021). Impacts of COVID-19 on transportation: Summary and synthesis of interdisciplinary research. *Transportation research interdisciplinary perspectives*, 9, 100305.
- King County Metro, 2015. *Right Size Parking: Final Report*.
- Kliment Ohridski" -Bitola, S. (2009). Role of functional classification of highways in road traffic safety. *Transportation Problem*, 4(3), 1. <https://www.researchgate.net/publication/38104647>

- 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.
- Krosnick, J. A. and M. K. Berent (1993). "Comparisons of party identification and policy preferences: The impact of survey question format." *American Journal of Political Science*: 941-964.
- Lally, P., Van Jaarsveld, C. H., Potts, H. W., & Wardle, J. (2010). How are habits formed: Modelling habit formation in the real world. *European journal of social psychology*, 40(6), 998-1009.
- Lavrakas, P. J. (2008). *Encyclopedia of survey research methods*, Sage publications.
- Li, X., J. Guo, C. Gao, Z. Su, D. Bao and Z. Zhang (2018). "Network-based transportation system analysis: A case study in a mountain city." *Chaos, Solitons & Fractals* 107: 256-265.
- Litman, T., 2021. *Transportation Affordability: Evaluation and Improvement Strategies*. Victoria Transport Policy Institute.
- Liu, D., Kwan, M.P., Kan, Z.H., Song, Y.M., 2021. An integrated analysis of housing and transit affordability in the Chicago metropolitan area. *Geogr. J.* 187, 110–126. <https://doi.org/10.1111/geoj.12377>
- Liu, S., Wang, J., & Fu, T. (2016). Effects of lane width, lane position and edge shoulder width on driving behavior in underground urban expressways: A driving simulator study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/ijerph13101010>
- Lu, Q.-C., L. Zhang, P.-C. Xu, X. Cui and J. Li (2022). "Modeling network vulnerability of urban rail transit under cascading failures: A Coupled Map Lattices approach." *Reliability Engineering & System Safety* 221: 108320.
- Ma, Z., Ferreira, L., Mesbah, M., 2014. Measuring service reliability using automatic vehicle location data. *Mathematical Problems in Engineering* 2014.
- Malhotra, N. K., et al. (2006). "Common method variance in IS research: A comparison of alternative approaches and a reanalysis of past research." *Management science* 52(12): 1865-1883.
- Mastroianni, J., 2020. "Drive until you qualify": Mortgage stress test forces homebuyers further outside GTA to find house they can afford. *Financ. Post*. URL <https://financialpost.com/real-estate/mortgages/drive-until-you-qualify-mortgage-stress-test-forces-gta-buyers-to-look-for-smaller-homes-distant-locations-to-find-something-they-can-afford>
- Mazloumi, E., Currie, G., Rose, G., 2010. Using gps data to gain insight into public transport travel time variability. *Journal of transportation engineering* 136, 623–631.
- McFadden, D. (1977). *Quantitative Methods for Analyzing Travel Behaviour of Individuals: Some Recent Developments*. Retrieved from
- Mehdizadeh, M., et al. (2018). "Accident involvement among Iranian lorry drivers: Direct and indirect effects of background variables and aberrant driving behaviour." *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour* 58: 39-55.

- Molloy, J., Tchervenkov, C., Hintermann, B., & Axhausen, K. W. (2020). Tracing the Sars-CoV-2 Impact: The First Month in Switzerland–March to April 2020. *Arbeitsberichte Verkehrs-und Raumplanung*, 1503.
- Morency, C., Bourdeau, J.-S., Verreault, H. (2022). Développement et mise en place d'un inventaire dynamique de stationnement à Montréal, Rapport méthodologique déposé à l'Agence de mobilité durable de Montréal, 47 pages.
- Muth, R., 1969. *Cities and housing*. University of Chicago Press.
- Nama, S., Maurya, A. K., Maji, A., Edara, P., & Sahu, P. K. (2016). Vehicle Speed Characteristics and Alignment Design Consistency for Mountainous Roads. *Transportation in Developing Economies*, 2(2). <https://doi.org/10.1007/s40890-016-0028-3>
- News-Medical. How does SARS-CoV-2 Compare to SARS-CoV? Retrieved from <https://www.news-medical.net/health/How-does-SARS-CoV-2-Compare-to-SARS-CoV.aspx>
- Nian, G., Peng, B., Sun, D., Ma, W., Peng, B., & Huang, T. (2020). Impact of COVID-19 on urban mobility during post-epidemic period in megacities: from the perspectives of taxi travel and social vitality. *Sustainability*, 12(19), 7954.
- Nunnally, J. C. (1978). *Psychometric Theory* 2nd ed, Mcgraw hill book company.
- OCDE, 2019. *Analyse coûts-avantages et environnement: Avancées théoriques et utilisation par les pouvoirs publics*.
- OCDE, 2021. *Building for a better tomorrow: Policies to make housing more affordable* Employment, Labour and Social Affairs Policy Briefs.
- OCDE, Eurostat, OIT, FMI, BM, CEENU, 2013. *Handbook on Residential Property Price Indices*.
- Ossokina, I.V., Verweij, G., 2015. Urban traffic externalities: Quasi-experimental evidence from housing prices. *Reg. Sci. URBAN Econ.* 55, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2015.08.002>
- Outay, F., Galland, S., Gaud, N., & Abbas-Turki, A. (2021). Simulation of connected driving in hazardous weather conditions: General and extensible multiagent architecture and models. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 104. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2021.104412>
- Pegah Nouri. (2015). *Enhancing the Gasoline Vehicles' CO2 Emissions Estimation in Montreal*. Polytechnique Montreal.
- Pembina, 2012. *Live where you go: encouraging location-efficient development in Ontario*.
- Perk, V.A., Flynn, J.A., Volinski, J., et al., 2008. *Transit ridership, reliability, and retention*. Technical Report. National Center for Transit Research (US).
- Petrucelli, U., Supino, A., 2015. Guidelines of some European countries for the assessment of transport externalities. *Ing. Ferro. 70*, 267–288.
- Quinlan, J.R., 1987. Simplifying decision trees. *International journal of man-machine studies* 27, 221–234.
- Qureshi, K. N. and A. H. Abdullah (2013). "A survey on intelligent transportation systems." *Middle-East Journal of Scientific Research* 15(5): 629-642.

- Rahim, M. A. and N. R. Magner (1995). "Confirmatory factor analysis of the styles of handling interpersonal conflict: First-order factor model and its invariance across groups." *Journal of Applied Psychology* 80(1): 122.
- Raykov, T. (1997). "Estimation of Composite Reliability for Congeneric Measures." *Applied Psychological Measurement* 21(2): 173-184.
- Revilla, M. (2017). "Analyzing survey characteristics, participation, and evaluation across 186 surveys in an online opt-in panel in Spain." *methods, data, analyses* 11(2): 28.
- Revilla, M. and C. Ochoa (2017). "Ideal and maximum length for a web survey." *International Journal of Market Research* 59(5): 557-565.
- Rigdon, E. E. (1996). "CFI versus RMSEA: A comparison of two fit indexes for structural equation modeling." *Structural Equation Modeling* 3: 369-379.
- Rogelberg, S. G., et al. (2000). "Employee attitude surveys: Examining the attitudes of noncompliant employees." *Journal of Applied Psychology* 85(2): 284.
- Rudžionienė, J., et al. (2018). "Drop out factors in data literacy and research data management survey: experiences from Lithuania and Finland." *Informacijos mokslai* 82: 115-130.
- Saberi, M., Wu, H., Amoh-Gyimah, R., Smith, J., Arunachalam, D., 2017. Measuring housing and transportation affordability: A case study of Melbourne, Australia. *J. Transp. Geogr.* 65, 134–146. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2017.10.007>
- Sakshaug, J. W., et al. (2019). "Paper, e-mail, or both? Effects of contact mode on participation in a web survey of establishments." *Social Science Computer Review* 37(6): 750-765.
- Saleh, A. and K. Bista (2017). "Examining factors impacting online survey response rates in educational research: Perceptions of graduate students." *Online Submission* 13(2): 63-74.
- Saleh, W., Kumar, R., & Sharma, A. (2010). Driving cycle for motorcycles in modern cities: case studies of Edinburgh and Delhi. *World Journal of Science, Technology and Sustainable Development*, 7(3), 263–274. <https://doi.org/10.1108/20425945201000017>
- Sarmiento, R. P. and V. Costa (2019). "Confirmatory factor analysis--a case study." arXiv preprint arXiv:1905.05598.
- Schiller, R., 2007. Understanding recent trends in house prices and home ownership (Working Paper No. 13553). National Bureau of Economic Research, Cambridge.
- SCHL, 2019. S'éloigner pour acheter : le déplacement en vaut-il le coût? *Marché Sous Loupe RMR Montr.* Juin 2019, 32.
- SCHL, 2020. Présentation du concept de difficultés de logement.
- Schmid, B. and K. W. Axhausen (2019). "Predicting response rates of all and recruited respondents: A first attempt." *Transport Findings*.
- Schouten, A., 2021. Residential Location and Household Spending: Exploring the Relationship Between Neighborhood Characteristics and Transportation and Housing Costs. *URBAN Aff. Rev.*
- Schwedhelm, A., Li, W., Harms, L., & Adriaola-Steil, C. (2020). Biking provides a critical lifeline during the coronavirus crisis.

- Scott, D. M., D. C. Novak, L. Aultman-Hall and F. Guo (2006). "Network robustness index: A new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks." *Journal of Transport Geography* 14(3): 215-227.
- Shamshiripour, A., Rahimi, E., Shabanpour, R., & Mohammadian, A. K. (2020). How is COVID-19 reshaping activity-travel behavior? Evidence from a comprehensive survey in Chicago. *Transportation research interdisciplinary perspectives*, 7, 100216.
- Shankar, A., et al. (2020). "How do electronic word of mouth practices contribute to mobile banking adoption?" *Journal of Retailing and Consumer Services* 52: 101920.
- Sharifi, A., & Khavarian-Garmsir, A. R. (2020). The COVID-19 pandemic: Impacts on cities and major lessons for urban planning, design, and management. *Science of the Total Environment*, 749, 142391.
- Sharp, L. M. and J. Frankel (1983). "Respondent burden: A test of some common assumptions." *Public opinion quarterly* 47(1): 36-53.
- Shoup, D. C. (2005). *The high cost of free parking (vol. 7)*: Planners Press, American Planning Association Chicago.
- Shrestha, N. (2021). "Factor analysis as a tool for survey analysis." *American Journal of Applied Mathematics and Statistics* 9(1): 4-11.
- Silvano, A. P., & Bang, K. L. (2016). Impact of speed limits and road characteristics on free-flow speed in urban areas. *Journal of Transportation Engineering*, 142(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000800](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000800)
- Singer, E., et al. (1999). "The effect of incentives on response rates in interviewer-mediated surveys." *Journal of Official Statistics* 15(2): 217.
- Smart, M., Klein, N., 2018. Complicating the Story of Location Affordability. *Hous. POLICY DEBATE* 28, 393–410.
- Smyth, J. D., et al. (2006). "Comparing check-all and forced-choice question formats in web surveys." *Public opinion quarterly* 70(1): 66-77.
- Snelder, M., H. Van Zuylen and L. Immers (2012). "A framework for robustness analysis of road networks for short term variations in supply." *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 46(5): 828-842.
- Statistique Canada, 2014. Migration from central to surrounding municipalities in Toronto, Montréal and Vancouver [WWW Document]. URL <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/11-008-x/2010002/article/11159-eng.htm> (accessed 12.7.20).
- Stevanovic-Briatico, V. (2013). *City of Toronto Road Classification System*.
- Stiglitz, J., Walsh, C., Lafay, J.-D., 2007. *Principes d'économie moderne*, 3e édition. ed. De Boeck, Bruxelles.
- Stocké, V. and B. Langfeldt (2004). "Effects of survey experience on respondents' attitudes towards surveys." *Bulletin of Sociological Methodology/Bulletin de Méthodologie Sociologique* 81(1): 5-32.
- Stone, M. (1979). Comments on model selection criteria of Akaike and Schwarz. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 276-278.

- Stone, M.E., 2006. What is housing affordability? The case for the residual income approach. *Hous. Policy Debate* 17, 151–184. <https://doi.org/10.1080/10511482.2006.9521564>
- Stringer, N. C. S. M. (2017). "The Economic Cost of Subway Delays." Office of the New York City Comptroller Scott M. Stringer.
- Sullivan, J. L., D. C. Novak, L. Aultman-Hall and D. M. Scott (2010). "Identifying critical road segments and measuring system-wide robustness in transportation networks with isolating links: A link-based capacity-reduction approach." *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 44(5): 323-336.
- Svenson, G., & Fjeld, D. (2016). The impact of road geometry and surface roughness on fuel consumption of logging trucks. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 31(5), 526–536. <https://doi.org/10.1080/02827581.2015.1092574>
- Taylor, M. (2017). *Vulnerability analysis for transportation networks*, Elsevier.
- Thometz, K. (2020). UIC Study Analyzes How COVID-19 Has Changed Travel Behavior, Lifestyles. Retrieved from <https://news.wttw.com/2020/06/14/uic-study-analyzes-how-covid-19-has-changed-travel-behavior-lifestyles>
- Trepanier, M., Morency, C., Agard, B., 2009. Calculation of transit performance measures using smartcard data. *Journal of Public Transportation* 12, 5.
- Troko, J., Myles, P., Gibson, J., Hashim, A., Enstone, J., Kingdon, S., . . . Van-Tam, J. N. (2011). Is public transport a risk factor for acute respiratory infection? *BMC infectious diseases*, 11(1), 1-6.
- U.S. Department of Commerce, 2015. 2015 Characteristics of New Housing.
- U.S. Department of Housing, 2017. Defining Housing Affordability. URL <https://www.huduser.gov/portal/pdredge/pdr-edge-featd-article-081417.html>
- Varella, R. A., Faria, M. V., Mendoza-Villafuerte, P., Baptista, P. C., Sousa, L., & Duarte, G. O. (2019). Assessing the influence of boundary conditions, driving behavior and data analysis methods on real driving CO₂ and NO_x emissions. *Science of the Total Environment*, 658, 879–894. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.053>
- Ville de Montréal, 2019. Définition du logement abordable dans différents programme.
- Ville de Montréal, 2020a. Règlement pour une métropole mixte: Document explicatif, version révisée, novembre 2020.
- Ville de Montréal, 2020b. Fiche d'urbanisme. politique locale sur la contribution des nouveaux projets résidentiels au logement abordable, social et familial.
- Vitkienė, J., Puodžiukas, V., & Žilionienė, D. (2017). New approach to the Lithuanian road classification based on worldwide experience. 10th International Conference on Environmental Engineering, ICEE 2017. <https://doi.org/10.3846/enviro.2017.155>
- Von Ferber, C., T. Holovatch, Y. Holovatch and V. Palchykov (2009). "Public transport networks: empirical analysis and modeling." *The European Physical Journal B* 68(2): 261-275.
- Walston, J. T., et al. (2006). "The influence of web-based questionnaire presentation variations on survey cooperation and perceptions of survey quality." *Journal of Official Statistics* 22(2): 271.

- Wang, X., Y. Koç, S. Derrible, S. N. Ahmad, W. J. Pino and R. E. Kooij (2017). "Multi-criteria robustness analysis of metro networks." *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 474: 19-31.
- Wang, Y. and C. Tian (2020). "Measure vulnerability of metro network under cascading failure." *IEEE Access* 9: 683-692.
- Wang, Y., 2020. A Methodology for Identifying Inconsistencies Between Scheduled and Observed Travel and Transfer Times using Transit AVL data: Framework and Case Study of Columbus, OH. Master's thesis. The Ohio State University
- Wassmer, 2008, 2008. Causes of Urban Sprawl in the United States: Auto reliance as compared to natural evolution, flight from blight, and local revenue reliance. *J. Policy Anal. Manage.* 27, 536–555
- WHO, W. H. O. (2022). Two years of COVID-19: new report highlights the 100 weeks of WHO/Europe's efforts to protect lives and livelihoods during the pandemic. Retrieved from <https://www.who.int/europe/news/item/11-03-2022-two-years-of-covid-19-new-report-highlights-the-100-weeks-of-who-europe-s-efforts-to-protect-lives-and-livelihoods-during-the-pandemic>
- WHO, W. H. O. WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard. Retrieved from <https://covid19.who.int/>
- Wu, X., H. Dong, C. K. Tse, I. W. Ho and F. C. Lau (2018). "Analysis of metro network performance from a complex network perspective." *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 492: 553-563.
- Wu, Y., Z. Chen, X. Zhao, Y. Liu, P. Zhang and Y. Liu (2021). "Robust analysis of cascading failures in complex networks." *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 583: 126320.
- Xia, Y. and Y. Yang (2019). "RMSEA, CFI, and TLI in structural equation modeling with ordered categorical data: The story they tell depends on the estimation methods." *Behavior Research Methods* 51(1): 409-428.
- Xu, H. and Y. Li (2019). "Robustness analysis of urban rail transit network." *International Journal of Performability Engineering* 15(10): 2762.
- Yan, T., et al. (2010). "Should I Stay or Should I go: The Effects of Progress Feedback, Promised Task Duration, and Length of Questionnaire on Completing Web Surveys." *International Journal of Public Opinion Research* 23(2): 131-147.
- Yan, T., et al. (2014). The impact of response burden on data quality in a longitudinal survey. *Proceedings of the International Total Survey Error Workshop*, October.
- Yan, T., et al. (2020). "Response burden: What is it and what predicts it?" *Advances in Questionnaire Design, Development, Evaluation and Testing*: 193-212.
- Zhang, J. and M. Wang (2019). "Transportation functionality vulnerability of urban rail transit networks based on movingblock: The case of Nanjing metro." *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* 535: 122367.
- 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, J., et al. (2011). "Data-driven intelligent transportation systems: A survey." IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 12(4): 1624-1639.

Zhang, J., S. Wang and X. Wang (2018). "Comparison analysis on vulnerability of metro networks based on complex network." Physica A: Statistical Mechanics and its Applications 496: 72-78.

Zhu, W., K. Liu, M. Wang and X. Yan (2018). "Enhancing robustness of metro networks using strategic defense." Physica A: Statistical Mechanics and its Applications 503: 1081-1091.

Zillmann, D., et al. (2014). "Survey topic and unit nonresponse." Quality & quantity 48(4): 2069-2088.