

Chaire Mobilité

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

Rapport d'activités 2020



Chaire Mobilité

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

Rapport d'activités 2020

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 – 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 2021

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 (2021). Rapport d'activités 2020, Polytechnique Montréal, 173 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.....	3
1.3	Programme de recherche.....	4
1.4	Contenu du rapport.....	5
2	Activités de recherche.....	6
2.1	Maîtrises complétées en 2020	6
2.2	Méthodologie d'évaluation du partage spatiotemporel de la rue.....	7
2.2.1	Introduction.....	7
2.2.2	Objectifs.....	7
2.2.3	Revue de la littérature.....	8
2.2.4	Méthodologie	9
2.2.5	Résultats	20
2.2.6	Conclusions.....	31
2.2.7	Perspectives.....	34
2.3	Comprendre les facteurs de dépendance à l'automobile.....	35
2.3.1	Résumé.....	37
2.3.2	Introduction.....	38
2.3.3	Revue de la littérature.....	39
2.3.4	Méthodologie	40
2.3.5	Résultats	47
2.3.6	Résultats	48
2.3.7	Discussion	52
2.3.8	Conclusion	54
2.3.9	Remerciements.....	55
2.4	Mesure des changements dans les comportements de déplacement multimodaux dus à l'amélioration de l'offre de transport	56
2.4.1	Introduction.....	56
2.4.2	Revue de la littérature.....	56

2.4.3	Méthodologie	59
2.4.4	Résultats	64
2.4.5	Conclusion	73
2.5	Méthode de synthétisation spatialisée de la population et de sa mobilité	75
2.5.1	Introduction.....	75
2.5.2	Revue de littérature.....	76
2.5.3	Enjeux et problématique	83
2.5.4	Objectifs.....	84
2.5.5	Méthodologie	85
2.5.6	Avancement.....	87
2.5.7	Conclusion	93
2.6	Comment évaluer la qualité et la diversité des alternatives de transport en commun? 94	
2.6.1	Introduction.....	94
2.6.2	Revue de la littérature.....	95
2.6.3	Méthodologie	96
2.6.4	Diversité brute	98
2.6.5	Qualité relative	99
2.7	Analyse des interactions entre étalement urbain et offre et demande en transport	105
2.7.1	Contexte et objectifs	105
2.7.2	Méthodologie	105
2.7.3	Résultats et travaux en cours	106
2.9	Codification et utilisation du réseau intérieur du centre-ville de Montréal	107
2.9.1	Introduction.....	107
2.9.2	Objectifs.....	107
2.9.3	Revue de la littérature.....	107
2.9.4	Méthodologie	107
2.9.5	Étude de cas.....	110
2.9.6	Conclusion	115
2.10	Efficacité globale des choix résidentiels	117
2.10.1	Introduction.....	117
2.10.2	Objectifs.....	117
2.10.3	Revue de la littérature.....	117
2.10.4	Méthodologie	118
2.10.5	Résultats	124

2.10.6	Conclusion	126
2.11	Algorithme de génération d’alternatives de trajets de transport collectif	128
2.11.1	Objectifs.....	128
2.11.2	Contenu	128
2.11.3	Revue de littérature.....	129
2.11.4	Données et méthodologie	130
2.11.5	Résultats	134
2.11.6	Conclusion	142
2.12	Évaluation économique du coût de la pollution atmosphérique découlant du secteur des transports : données, méthodes et pratiques.....	144
2.12.1	Introduction.....	144
2.12.2	État d’avancement des travaux de recherche.....	145
2.12.3	Techniques de valorisation économique des impacts environnementaux.....	147
2.12.4	Conclusion	156
3	Rayonnement	157
3.1	Publications (2020).....	157
3.2	Principales participations à des congrès	157
3.2.1	Congrès annuel du Transportation research board 2020	157
3.2.2	Autres présentations	158
4	Références.....	159

Liste des figures

Figure 1-1. Représentation schématique du programme de recherche de la Chaire Mobilité	5
Figure 2-1 : Territoire d'étude	10
Figure 2-2 : Extrait de la base de données de l'Inventaire des actifs de voirie	12
Figure 2-3 : Intégration des différents jeux de données pour mesurer le partage de la rue.....	12
Figure 2-4 : Modes et combinaisons de modes possibles pour une rue (adapté de StreetMix) ..	13
Figure 2-5 : Allocation de l'espace de voirie – l'exemple de la rue Papineau à l'intersection de la rue Notre-Dame Est.....	13
Figure 2-6 : Indice canopée de la CMM.....	14
Figure 2-7 : Corridors sanitaires mis en place durant l'été 2020	15
Figure 2-8 : Effet de l'ajout d'une voie piétonnisée et d'une voie cyclable sur l'indice d'entropie de Shannon.....	16
Figure 2-9 : Passagers-kilomètres parcourus (PKP) sur le territoire d'étude selon le mode, profil de demande observée, Enquête OD 2013	17
Figure 2-10 : Identification des axes faisant partie d'un corridor	18
Figure 2-11 : Passagers-kilomètres parcourus (PKP) sur le territoire d'étude selon le mode, profil de demande potentielle (2), Enquête OD 2013	20
Figure 2-12 : Répartition de l'espace de voirie selon le mode ou la combinaison de modes, période de pointe AM, jour moyen de semaine d'automne	21
Figure 2-13 : Variation de l'allocation de l'espace de voirie au cours d'une journée de semaine d'automne, arrondissement Ville-Marie.....	22
Figure 2-14 : Équilibre de la distribution de l'espace des rues du territoire d'étude entre les dimensions de lien, de lieu et d'environnement.....	23
Figure 2-15 : Variation de l'indice d'entropie de Shannon à la suite de la mise en place des corridors sanitaires durant la pandémie de COVID-19 (2020) par rapport à la situation de référence (2018)	24
Figure 2-16 : Distribution spatiale de l'écart offre-demande selon le mode, période de pointe de l'avant-midi, jour moyen de semaine d'automne.....	26
Figure 2-17 : Écart offre-demande selon l'origine et la destination des déplacements, arrondissement Ville-Marie, heure de pointe de l'avant-midi, jour moyen de semaine d'automne	27
Figure 2-18 : Distribution de l'indice d'écart offre-demande à l'échelle du corridor, demande observée, pointe AM, jour moyen de semaine d'automne	29
Figure 2-19 : Distribution de l'indicateur d'écart offre-demande à l'échelle du corridor pour l'ensemble du territoire d'étude selon le mode, le profil de demande et le principe de distribution, demande observée, pointe AM, jour moyen de semaine d'automne	30
Figure 2-20 : Schéma général des contributions du projet doctoral et avancement au début de l'année 2021.....	35
Figure 2-21 : Schéma détaillé de la Phase I du projet doctoral.....	36
Figure 2-22 : Distribution du nombre de véhicules / ménage sur l'Île de Montréal à l'échelle des AD de 2016. Dans la légende, les valeurs entre [] indiquent le nombre de AD.	45
Figure 2-23 : Diagramme de Moran pour la variable dépendante (véhicules / ménage) avec une matrice de voisinage des 30 plus proches voisins. Les points en étoiles indiquent des observations avec une influence importante sur l'indice I de Moran	47
Figure 2-24 Schéma général de la méthodologie.....	59
Figure 2-25 Typologie de voisinages (proportion de ménages)	65

Figure 2-26 Typologie de voisinages – Centres : variables normalisées moyennes par type	65
Figure 2-27 Typologie de ménages (en fonction de l’amplitude maximale des âges et de l’âge moyen des membres).....	66
Figure 2-28 Histogrammes de l’indicateur de multimodalité calculé par type de personnes pour différentes unités de mesure des intensités d’utilisation (segments de déplacements, déplacements, distance ou durée de trajet) et différents niveaux d’agrégation des modes (AG1, AG2 ou AG3)	68
Figure 2-29 Histogrammes de l’indicateur de multimodalité calculé par type de personnes pour différentes valeurs du paramètre ϵ – Exemple pour DAL_m (temps) AG1.....	69
Figure 2-30 Arbres de régression pour la prévision de l'indicateur de multimodalité DAL_m (temps) AG1 $\epsilon=0,6$ calculé par type de personnes (a) en 2013, (b) en 2018	70
Figure 2-31 Niveaux du système de zonage: (a) Région; (b) Groupe de SR; (c) SR; (d) AD	88
Figure 2-32 Scénarios testés: (a) S1; (b) S2; (c) S3; (d) S4	88
Figure 2-33 Somme des erreurs absolues (β) selon I_p	91
Figure 2-34 Erreurs sur les totaux (γ) selon I_p	92
Figure 2-35. Alternatives de transport en commun pour une paire origine-destination	94
Figure 2-36. Schéma méthodologique	96
Figure 2-37. Méthode de conversion de numéro de ligne.....	97
Figure 2-38. Identification de l’alternative choisie.....	98
Figure 2-39. Distribution des paires OD selon le nombre d’alternatives de transport en commun	98
Figure 2-40. Distribution fréquentielle des facteurs multiplicatifs de temps de parcours	99
Figure 2-41. Exemple de facteurs multiplicatifs pour une paire OD	100
Figure 2-42. Distribution des paires OD selon le nombre d’alternatives de transport en commun en fonction du facteur multiplicatif	100
Figure 2-43. Nombre moyen d’alternatives par paire OD selon le secteur d’origine et le facteur multiplicatif de temps de parcours (excluant les retours au domicile).....	102
Figure 2-44. Nombre moyen d’alternatives par paire OD selon le secteur de destination et le facteur multiplicatif de temps de parcours (excluant les retours au domicile)	103
Figure 2-45. Matrices du nombre moyen d’alternatives par paire OD selon le facteur multiplicatif de temps de parcours.....	104
Figure 2-46. Processus de codification d’un réseau piéton intérieur en utilisant des données d’OpenStreetMap.....	108
Figure 2-47. Exemple de codification d’un lien piéton (footway) dans JOSM	108
Figure 2-48. Exemple de codification d’un escalier roulant dans JOSM	109
Figure 2-49. Exemple de codification d’un ascenseur dans JOSM	110
Figure 2-50. Illustration du réseau codifié et des stations de métro liées.....	111
Figure 2-51. Illustration des commerces codifiés pour l’étude de cas.....	112
Figure 2-52. Boîte à moustache des réductions de distance	114
Figure 2-53. Boîtes à moustache des distances réduites ou non	115
Figure 2-54 Schéma méthodologique global.....	119
Figure 2-55 Procédure de comparaison des déplacements latents.....	123
Figure 2-56 Distribution des distances de relocalisation des ménages en fonction d’une réduction ou d’une augmentation de la distance totale de déplacements pour motif contraint du ménage	124
Figure 2-57 Distribution des distances pour l’étude et le travail avant et après la relocalisation des ménages	125
Figure 2-58 Exemple de filtrage dans l'algorithme de génération d'alternatives	132

Figure 2-59 Algorithme de filtrage de lignes pour la génération d'alternatives	133
Figure 2-60 Distribution du nombre d'itinéraires déclarés en fonction du temps de parcours du trajet le plus rapide	135
Figure 2-61 Percentiles des ratios entre le temps de parcours du trajet déclaré par rapport au trajet le plus rapide en fonction du temps de parcours du trajet le plus rapide	136
Figure 2-62 Percentiles des ratios entre le temps de parcours du trajet déclaré par rapport au trajet le plus rapide en fonction du groupe d'âge.....	137
Figure 2-63 Percentiles des ratios entre le temps de parcours du trajet déclaré par rapport au trajet le plus rapide en fonction de l'activité à destination	137
Figure 2-64 Différences dans le nombre de transfert selon le temps de parcours du trajet le plus rapide.....	138
Figure 2-65 Différences dans le nombre de transfert selon l'activité à destination.....	139
Figure 2-66 Différences dans le nombre de transfert selon le groupe d'âge.....	140
Figure 2-67 Comparaison des combinaisons de modes entre le trajet le plus rapide et le trajet déclaré.....	141
Figure 2-68: Représentation théorique d'une externalité. Source : figure adaptée de Boardman et al. (2006).....	146
Figure 2-69: Schématisation des connaissances sur les polluants atmosphériques émis en transport et leurs impacts (Sources : Canada, E. et C. climatique (2004a, 2004b); Environnement Canada (2012, 2019), ECCC (2021), INSPQ (2018), OCDE (2014, 2018), Roy, R., Braathen (2017))	150
Figure 2-70: Émissions de polluantes atmosphériques associées aux transports, par source, Québec, 1990-2018	156

Liste des tableaux

Tableau 2-1 : Jeux de données utilisés	11
Tableau 2-2 : Déplacements retenus pour chacun des deux profils de demande potentielle	19
Tableau 2-3 : Écart offre-demande dans les rues du territoire d'étude selon l'arrondissement, heure de pointe du matin lors d'une journée moyenne de semaine d'automne.....	25
Tableau 2-4 : Statistiques descriptives de la variable dépendante et des variables explicatives potentielles.....	46
Tableau 2-5 : Résultats du modèle SDEM final (M3b.3).....	50
Tableau 2-6 : Ajustement du modèle final (SDEM M3b.3) à la suite du retrait de chaque variable une à une.....	51
Tableau 2-7 Typologie de ménages – Centres : variables moyennes par type	67
Tableau 2-8 Résultats du modèle des doubles différences avec un traitement basé sur l'évolution de l'offre de transport entre 2013 et 2018	72
Tableau 2-9 : Caractéristiques des huit catégories de la typologie de ménages (Fabre, 2018)....	82
Tableau 2-10 Variables de contrôle.....	87
Tableau 2-11 Erreurs absolues pour les variables de contrôle, par catégorie, par scénario	90
Tableau 2-12 Erreurs relatives pour les variables de contrôle, par catégorie, par scénario.....	91
Tableau 2-13. Résumé statistique des facteurs multiplicatifs de temps de parcours	100
Tableau 2-14. Résumé statistique du nombre d'alternatives par paire OD selon les seuils de qualité relative.....	101
Tableau 2-15. Nombre de liens codifiés par type.....	111
Tableau 2-16. Résumé de l'impact, en nombre de chemins, de l'utilisation du réseau intérieur	113
Tableau 2-17. Résumé de l'impact, en distance, de l'utilisation du réseau intérieur	113
Tableau 2-18 Typologie de ménage appliquée aux données de l'enquête OD 2013.....	120
Tableau 2-19 Comparaison des déplacements latents à la marche et à vélo avant et après la relocalisation des ménages	126
Tableau 2-20: Émissions totales des polluants atmosphériques par source, Québec, 2018	155

1 Introduction

1.1 Mission générale de la Chaire Mobilité

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

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

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

1.2 Structure organisationnelle

1.2.1 Partenaires

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

Avec les changements dans la gouvernance métropolitaine des transports, le 2^e mandat de la Chaire Mobilité est soutenu 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, professeure titulaire au département de mathématiques et génie industriel
- Pr Owen Waygood, professeur agrégé au département des génies civil, géologique et des mines
- Pre Geneviève Boisjoly, professeure adjointe au département des génies civil, géologique et des mines
- Pr Francesco Ciari, professeur adjoint au département des génies civil, géologique et des mines

La Chaire compte aussi sur la contribution de cinq 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.

Deux stagiaires post-doctoraux ont aussi été recrutés en 2020 afin de contribuer à différents projets de recherche.

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.

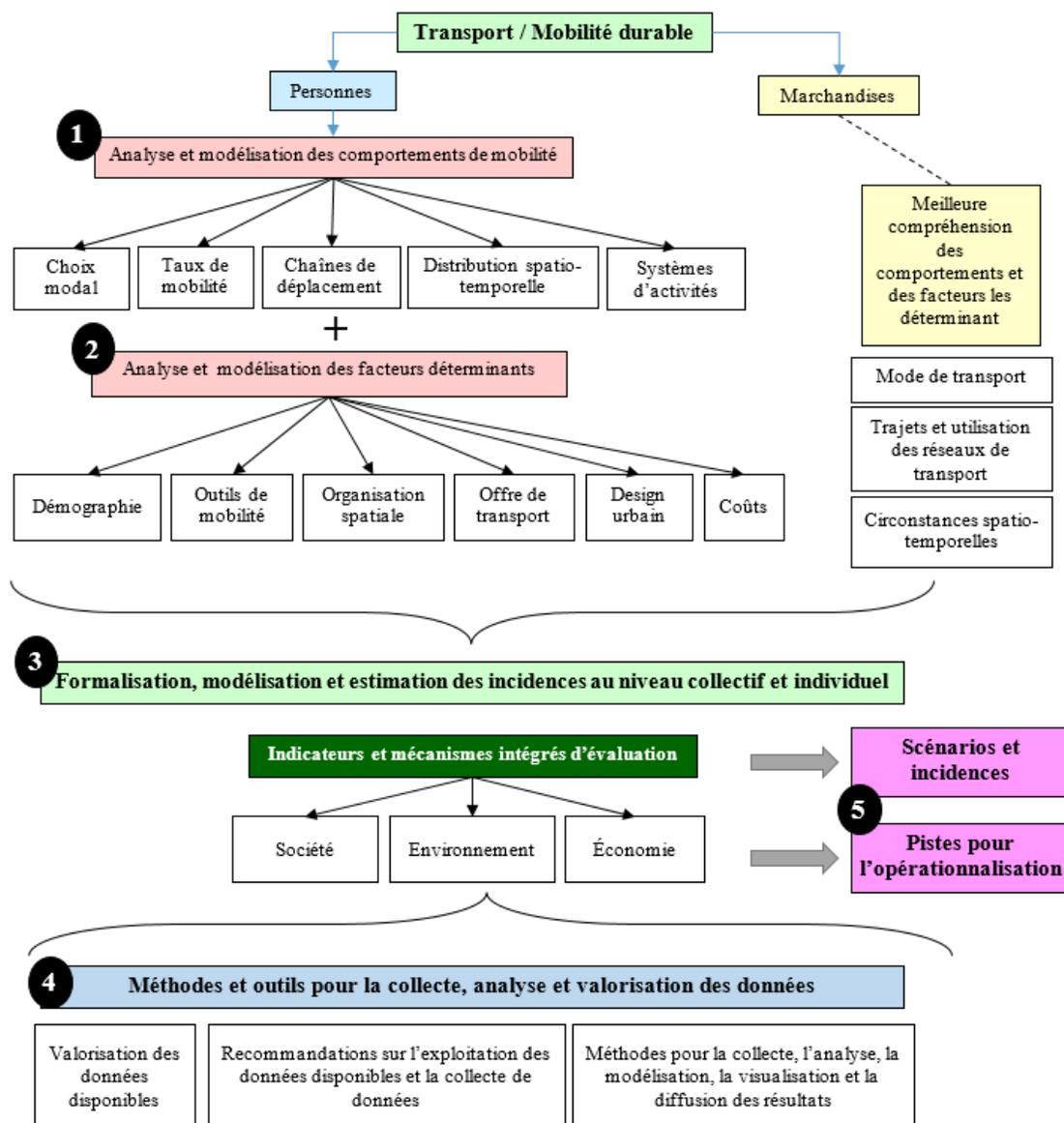


Figure 1-1. Représentation schématique du programme de recherche de la Chaire Mobilité

1.4 Contenu du rapport

Ce document fait état des activités de recherche conduites du 1^{er} janvier au 31 décembre 2020. 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.

2 Activités de recherche

2.1 Maîtrises complétées en 2020

Douville, J. (2020). Modélisation des systèmes d'activités pour fins de prévision de la demande de transport. (Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal).

Gauthier, M.-A. (2020). Impact du confort sur le choix des trajets en transport collectif. (Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal).

Mathieu, Y.-D. (2020). Déplacements par taxi : caractérisation et étude de compétitivité. (Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal).

Disson, B. (2020). Analyse du recours aux correspondances dans un réseau de transport en commun à l'aide des données de cartes à puce. (Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal).

2.2 Méthodologie d'évaluation du partage spatiotemporel de la rue

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

Cette section est constituée d'extraits de la thèse de doctorat en cours de rédaction de Gabriel Lefebvre-Ropars ainsi que d'extraits traduits de publications scientifiques¹.

2.2.1 Introduction

De plus en plus de documents de planification, au Québec et ailleurs, contiennent des objectifs relatifs à l'amélioration du partage de l'espace urbain entre les usagers de divers modes de transport (piétons, cyclistes, usagers du transport collectif, automobilistes, etc.). On peut citer par exemple la Stratégie centre-ville de Montréal (Ville de Montréal, 2017b) ou encore la Stratégie de mobilité urbaine de Stockholm (The City of Stockholm Traffic Administration, 2012). Toutefois, peu d'indicateurs de suivi et de mesure des résultats sont proposés pour assurer la mise en œuvre de ces objectifs. Le partage de l'espace – et du temps – urbain reste en effet un concept difficile à saisir, définir et mesurer.

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

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

2.2.2 Objectifs

Le projet de recherche vise à répondre à la question suivante : l'espace-temps urbain (dans la région de Montréal, en l'occurrence) est-il réparti de manière équitable entre tous les usagers? L'objectif général du projet est ainsi de développer des outils d'évaluation de l'équité dans

¹ Lefebvre-Ropars, G., Morency, C. et Negron-Poblete, P. (2021). A needs-gap analysis of street space allocation. *Journal of Transport and Land Use*, 14(1), 151-170. <https://doi.org/10.5198/jtlu.2021.1808>
Lefebvre-Ropars, G., Morency, C. et Negron-Poblete, P. (2021). Toward A Framework for Assessing the Fair Distribution of Space in Urban Streets: *Transportation Research Record*. <https://doi.org/10.1177/0361198121995196>

l'allocation de l'espace-temps urbain alloué à chaque mode de transport en milieu urbain. Les objectifs spécifiques de recherche sont les suivants :

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

2.2.3 Revue de la littérature

Le survol de la littérature scientifique et technique portant sur le partage de la rue effectué dans ce chapitre permet de tirer quelques constats qui orienteront les suites du présent projet de recherche. Tout d'abord, la rue doit être envisagée comme un objet multidimensionnel et non pas simplement comme un corridor de circulation. La dimension de lien est certes importante, mais le rôle de la rue comme lieu est tout aussi fondamental. L'équilibre entre ces dimensions, ainsi qu'entre les différents usagers au sein de ces dimensions – tout particulièrement entre les différents modes de transport –, doit être considéré non seulement comme un problème d'allocation d'une emprise physique, mais également d'une offre temporelle régulée à diverses échelles. Quelques auteurs (Creutzig et al., 2020; Jones et al., 2008, 2009; Nello-Deakin, 2019; Rodriguez-Valencia, 2014) ont proposé des esquisses de cadres théoriques relatifs au partage de la rue, mais aucun n'a encore accompli l'exercice de valider un tel cadre théorique à l'échelle d'un territoire urbain.

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

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

Du point de vue méthodologique, les approches existantes sont pour la plupart basées sur des méthodes manuelles de collecte de données, ce qui limite leur potentiel de généralisation à une échelle municipale ou métropolitaine sans devoir faire appel à des méthodes d'expansion basées sur des hypothèses. Les quelques méthodes basées sur une méthodologie automatisée présentent un bon potentiel de généralisation, mais sont limitées par les données disponibles sur les modes qui ne sont pas traditionnellement modélisés dans les outils de planification des

transports – les modes actifs en particulier – et doivent souvent recourir à des hypothèses afin de les traiter, quand ils ne sont pas complètement omis des analyses.

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

2.2.4 Méthodologie

Le présent projet de recherche vise à développer un cadre d'analyse ainsi que des outils de mesure et de modélisation de l'adéquation entre l'offre et la demande en espace-temps dans les rues urbaines, puis à proposer des scénarios alternatifs de partage de la rue selon divers profils de demande. Pour ce faire, une approche automatisée basée sur les grands ensembles de données géoréférencées est privilégiée afin de permettre le développement d'une méthode transférable à d'autres contextes urbains.

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

Le projet proposé se divise en trois grandes étapes, chacune amenant une contribution originale à la recherche sur le partage de la rue. Dans un premier temps, une méthode automatisée est développée afin de mesurer l'offre en espace-temps associée aux deux dimensions principales de la rue – le lieu et le lien – et, dans le cas du lien, aux différents modes de transport urbain. La distribution de cette offre est analysée à différentes échelles spatiales et temporelles ainsi qu'en relation avec la structure urbaine et les dynamiques sociodémographiques du milieu. C'est à cette étape qu'en est actuellement l'avancement du projet.

Dans un deuxième temps, la demande actuelle en espace-temps, ainsi que différents profils de demande potentielle, sont estimées afin d'établir si l'offre précédemment mesurée est distribuée de manière équilibrée en fonction des usagers actuels et potentiels de la rue et ce, en fonction de différents principes d'équité. Dans un troisième et dernier temps, une série de scénarios alternatifs de partage de la rue est élaborée à partir des conclusions tirées sur la distribution de l'offre ainsi que de différents profils de demande.

2.2.4.1 Territoire d'étude

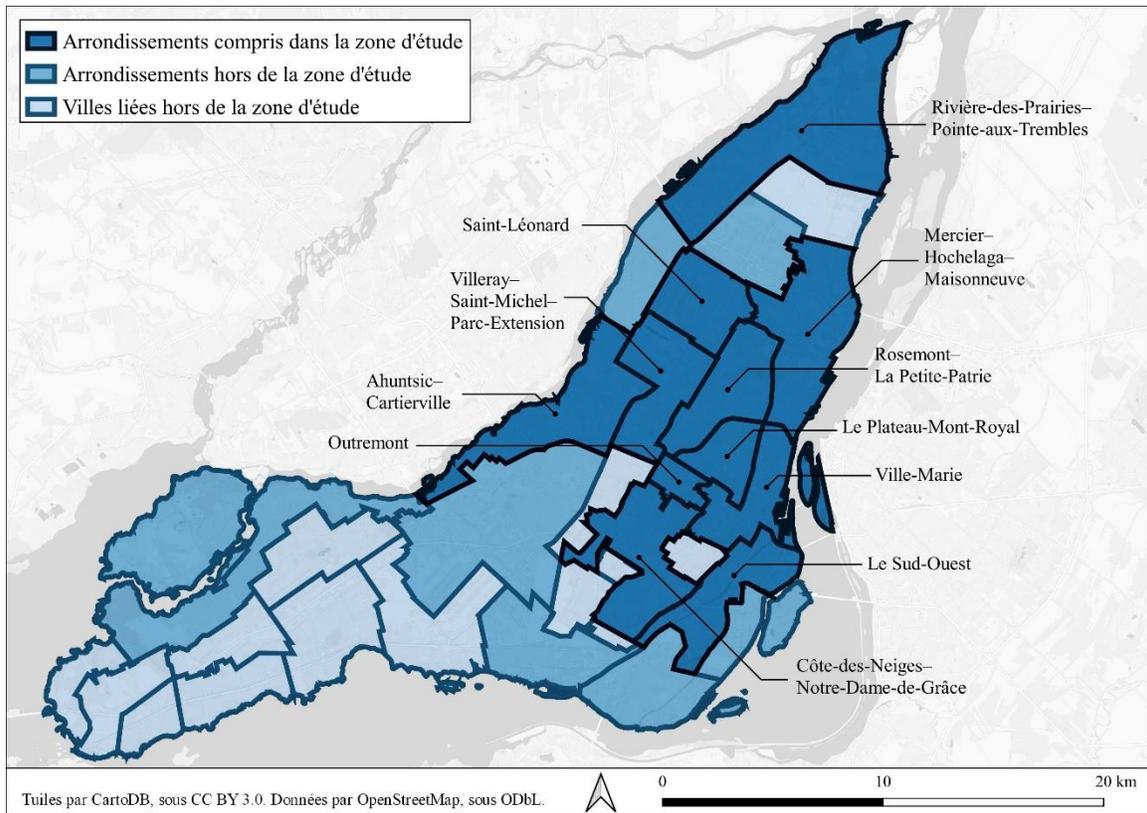


Figure 2-1 : Territoire d'étude

En raison du grand nombre de jeux de données disponibles ainsi que des partenariats avec les différents acteurs du milieu, le territoire d'étude pour le projet est l'agglomération de Montréal. Certaines analyses générales peuvent être effectuées à l'échelle de l'ensemble de l'agglomération tandis que d'autres, plus pointues, sont restreintes à 11 arrondissements identifiés à la figure 2-1.

2.2.4.2 Données utilisées

Le tableau 2-1 présente les différents jeux de données utilisés dans la mesure de l'espace-temps alloué aux divers modes dans les rues du territoire d'étude.

Tableau 2-1 : Jeux de données utilisés

Jeu de données	Producteur des données	Année	Type de géométrie	Attributs utilisés	Données ouvertes?
Inventaire des actifs de voirie	Ville de Montréal	2019	Polygone	<ul style="list-style-type: none"> Type de surface Arrondissement Identifiant de tronçon de géobase 	Oui (sauf l'identifiant de tronçon de géobase)
Géobase filaire	Ville de Montréal	2019	Ligne	<ul style="list-style-type: none"> Nombre de directions 	Oui
Réseau routier	Adresses Québec (AQpro)	2019	Ligne	<ul style="list-style-type: none"> Vitesse permise 	Non
Réseau routier du modèle de microsimulation	Ville de Montréal	2018	Ligne	<ul style="list-style-type: none"> Nombre de voies 	Non
Signalisation	Ville de Montréal	2018	Point	<ul style="list-style-type: none"> Règles de stationnement Périodes d'activité Type de Poteau 	Oui
Parcomètres	Ville de Montréal	2019	Point	<ul style="list-style-type: none"> Règles de stationnement Périodes d'activité 	Oui
Inventaires des mesures préférentielles pour bus	<ul style="list-style-type: none"> Ministère des Transports du Québec (MTQ) exo Société de transport de Montréal (STM) 	2017–2019	Ligne	<ul style="list-style-type: none"> Position sur la chaussée Véhicules permis Périodes d'activité 	Non
Réseau cyclable filaire	Ville de Montréal	2018	Ligne	<ul style="list-style-type: none"> Type d'infrastructure Périodes d'activité 	Oui
Stations BIXI	BIXI	2019	Point	<ul style="list-style-type: none"> Nombre d'ancrages 	Oui
Supports à vélo publics	Ville de Montréal	2017	Point	<ul style="list-style-type: none"> Capacité 	Oui
Arbres publics	Ville de Montréal	2018	Point	<ul style="list-style-type: none"> Position sur la chaussée Année de plantation 	Oui
Indice canopée	Communauté métropolitaine de Montréal (CMM)	2017	Polygone	<ul style="list-style-type: none"> Catégorie de surface 	Oui
Limites administratives	Ville de Montréal	2019	Polygone	<ul style="list-style-type: none"> Nom de l'arrondissement 	Oui
Recensement de la population	Statistique Canada	2016	Polygone	<ul style="list-style-type: none"> Population du secteur de recensement 	Non
Enquête Origine-Destination 2013, v13.2b	Autorité régionale de transport métropolitain (ARTM)	2013	Point	<ul style="list-style-type: none"> Origine et destination du déplacement Mode déclaré du déplacement Heure de départ du déplacement 	Non
Rôle d'évaluation foncière	Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation (MAMH)	2018	Point	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation du sol de l'unité d'évaluation 	Non
Corridors sanitaires	Ville de Montréal	2020	Ligne	<ul style="list-style-type: none"> Type de corridor 	Oui

2.2.4.3 Préparation des données

Les données présentées au tableau 2-1 sont tout d'abord importées dans une base de données PostgreSQL 10.9 dotée de l'extension spatiale PostGIS 2.5.2. Cela permet d'associer à chaque surface comprise dans l'inventaire des actifs de voirie (voir figure 2-2) les attributs des objets des autres jeux de données qui s'y trouvent.

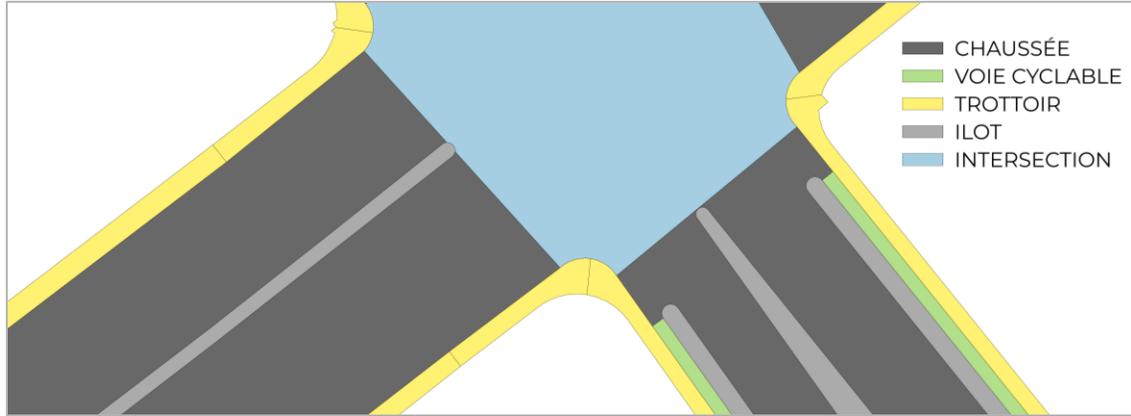


Figure 2-2 : Extrait de la base de données de l'Inventaire des actifs de voirie

Une fois les différents jeux de données fusionnés, il est possible de calculer l'espace alloué aux différents modes à l'échelle de chaque tronçon de rue, tel qu'illustré à la Figure 2-3. Un axe perpendiculaire est créé à tous les trois mètres pour chaque tronçon de rue et l'allocation de la voirie et des marges est calculée pour chacun de ces axes selon les paramètres d'activité de chacune des surfaces (ouverture de la voie réservée ou de la voie cyclable, présence d'une station BIXI, stationnement permis ou interdit, etc.) pour chacune des 17 520 périodes d'une demi-heure de l'année 2018.

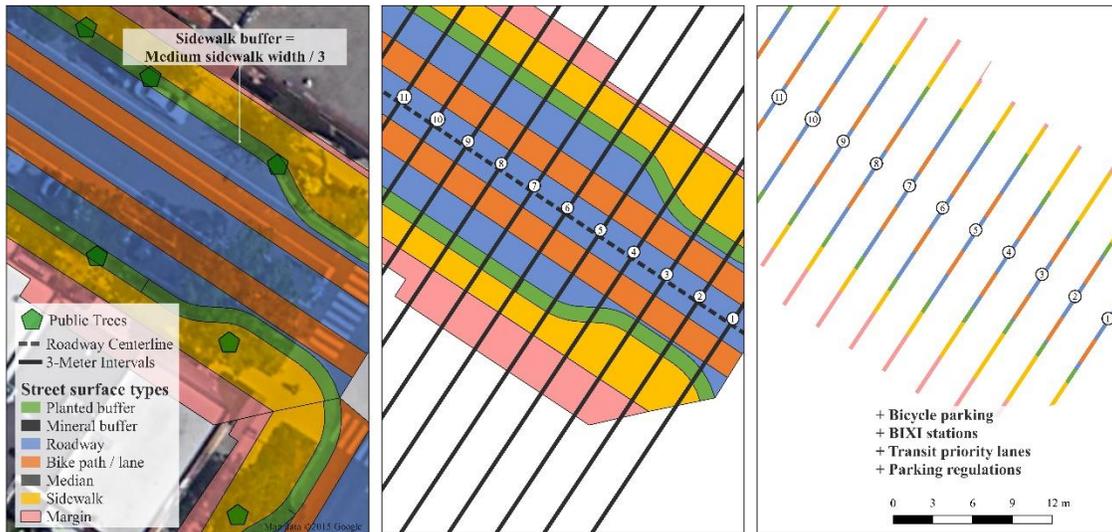


Figure 2-3 : Intégration des différents jeux de données pour mesurer le partage de la rue

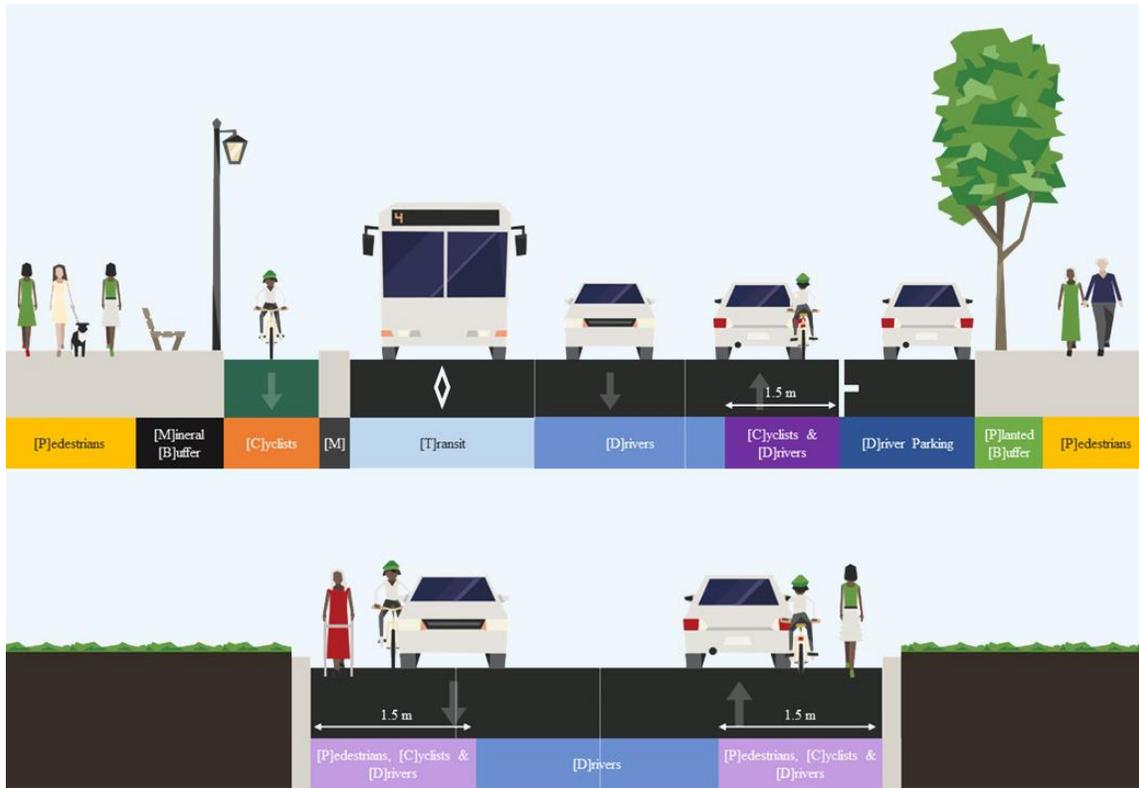


Figure 2-4 : Modes et combinaisons de modes possibles pour une rue (adapté de StreetMix)

La figure 2-4 montre différentes catégories d'allocation de l'espace de la voirie en fonction du mode ou de la combinaison de modes qui l'empruntent. On y remarque qu'en l'absence d'une infrastructure cyclable dédiée ou d'un trottoir, une part de la chaussée générale est considérée comme partagée entre les cyclistes et les conducteurs (zones CD) ou entre piétons, cyclistes et conducteurs (zones PCD), respectivement.

La figure 2-5 illustre l'allocation de l'espace par mode, en pourcentage de la superficie totale du segment de rue, sur la rue Papineau au nord de la rue Notre-Dame Est. On y observe que la circulation automobile ainsi que le terre-plein consomment la majorité de la superficie disponible.

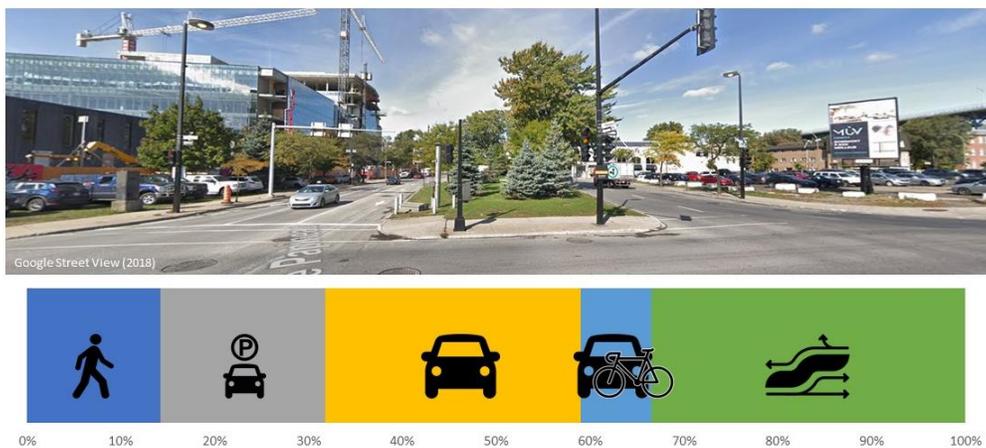


Figure 2-5 : Allocation de l'espace de voirie – l'exemple de la rue Papineau à l'intersection de la rue Notre-Dame Est

Il est ensuite possible d'agréger ces données à différentes échelles spatiales pour observer les variations spatiales du partage de la rue.

2.2.4.4 Évolution du partage de la rue au cours d'une journée

L'allocation des différentes surfaces dans les rues du territoire d'étude varie au fil du temps pour répondre à différents besoins. Il peut s'agir, à titre d'exemple, de voies de stationnement converties en voie de circulation ou en voies réservées pour autobus en période de pointe, de pistes cyclables qui ferment pour la saison hivernale, ou encore de rues piétonnes et partagées qui entrent en fonction durant la saison estivale. La présence de données répertoriant ces paramètres d'activité pour les rues du territoire d'étude permet de faire un suivi longitudinal du partage de la rue.

2.2.4.5 Équilibre entre les différentes dimensions de la rue

La rue n'est pas seulement un espace consacré au mouvement, mais également un lieu d'activités ainsi qu'un des espaces pouvant accueillir de la végétation en milieu urbain. C'est ce que propose Rodriguez-Valencia en considérant que les rôles qu'on doit équilibrer en concevant une rue sont les dimensions du lien, du lieu et de l'environnement (Rodriguez-Valencia, 2014).

L'allocation des surfaces présentée ci-haut permet de déterminer l'espace consacré aux dimensions de lien (voies de circulation, voies cyclables, trottoirs, stationnement en marge, etc.) ainsi que de lieu (trottoirs, banquettes et marges non consacrées au stationnement). En ajoutant l'indice canopée, illustré à la figure 2-6, on est également en mesure de mesurer l'espace consacré à l'environnement.



Figure 2-6 : Indice canopée de la CMM

La somme de l'espace consacré à chaque dimension est calculée pour les tronçons de rue du territoire d'étude. Une surface allouée à deux dimensions est comptée dans les deux catégories, puisqu'elle répond aux deux fonctions simultanément (un espace végétalisé relève de la dimension environnementale de la rue, mais peut également accueillir des activités liées à la dimension de lieu). Ces valeurs sont utilisées pour calculer l'indice d'entropie de Shannon pour chaque tronçon de rue, afin de déterminer l'équilibre entre les trois dimensions. Cet indicateur

permet d'exprimer l'homogénéité de la distribution d'une ressource donnée (l'espace de la rue, dans ce cas-ci) entre différents groupes. L'indice est calculé de la manière suivante :

$$E_{3D} = -1 * \frac{\left(\sum_{d=1}^3 \left(\frac{a_{ds}}{a_s}\right) \ln \left(\frac{a_{ds}}{a_s}\right)\right)}{\ln(3)}$$

Où d représente une des trois dimensions de la rue, p_{ds} la superficie allouée à la dimension d sur le tronçon de rue s et p_s la superficie totale du tronçon s . L'indice d'entropie de Shannon peut prendre une valeur entre 0 et 1, où 0 représente une situation où 100 % de l'espace est alloué à une seule dimension et 1 représente une distribution parfaitement égale de l'espace entre les trois dimensions.

Le potentiel de l'utilisation d'un tel indicateur est par la suite évalué en utilisant les aménagements temporaires mis en place durant l'été 2020 afin de favoriser le transport actif pendant la pandémie de COVID-19. Ces corridors sanitaires étaient composés d'une série de mesures – voies cyclables temporaires, trottoirs élargis, piétonnalisations partielles ou complètes – qui modifiaient l'équilibre entre les différentes dimensions de la rue (voir figure 2-7).

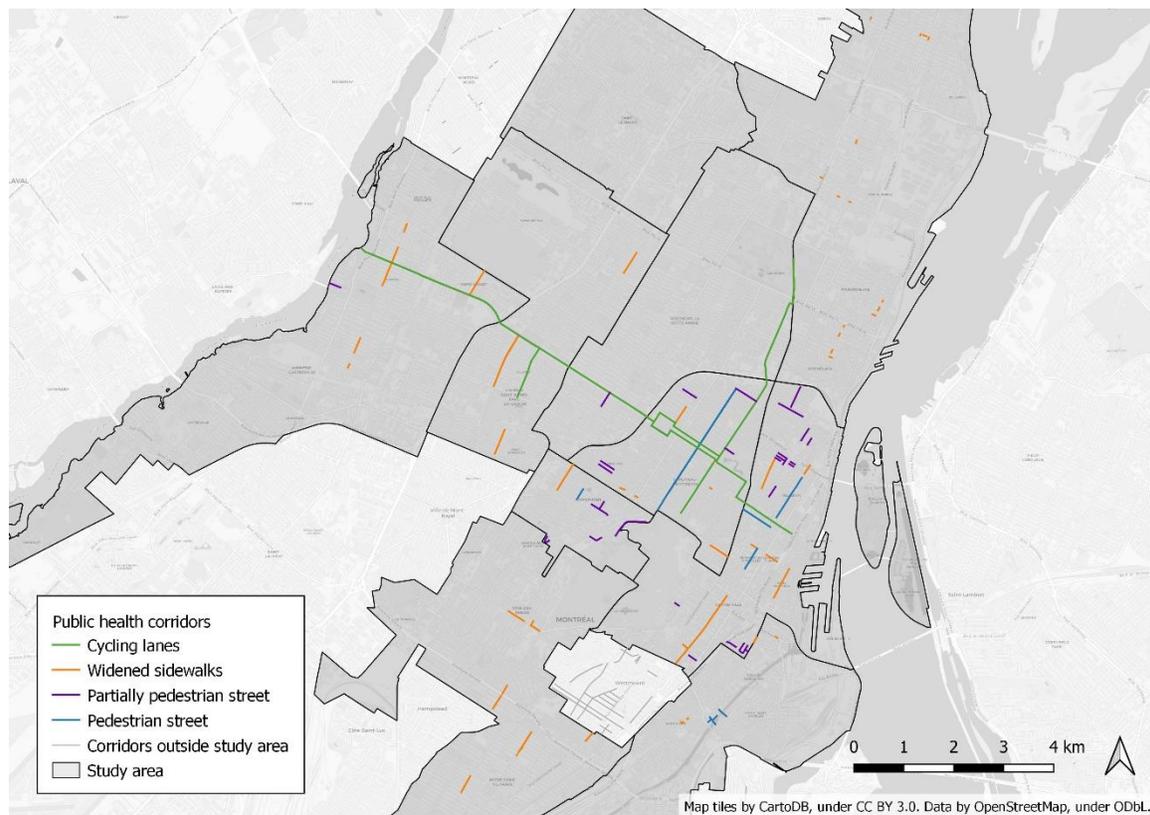


Figure 2-7 : Corridors sanitaires mis en place durant l'été 2020

L'indice d'entropie de Shannon est ainsi calculé pour les rues visées par des mesures sanitaires à la fois avant et après leur implantation afin de saisir la manière dont l'indicateur permet de saisir les variations dans le partage de la rue. La figure 2-8 montre l'effet que peuvent avoir diverses mesures d'extension de l'espace consacré au transport actif sur l'équilibre entre les trois dimensions de la rue tel que mesuré par l'indice d'entropie de Shannon. On y remarque que l'ajout d'une voie cyclable temporaire sur l'avenue Christophe-Colomb n'affecte pas l'équilibre

entre les trois dimensions puisqu'il s'agit simplement d'une modification de l'espace consacré à la dimension de lien, tandis que la piétonnisation d'une partie de la chaussée étend l'espace consacré à la dimension de lieu, modifiant ainsi l'équilibre entre les dimensions.

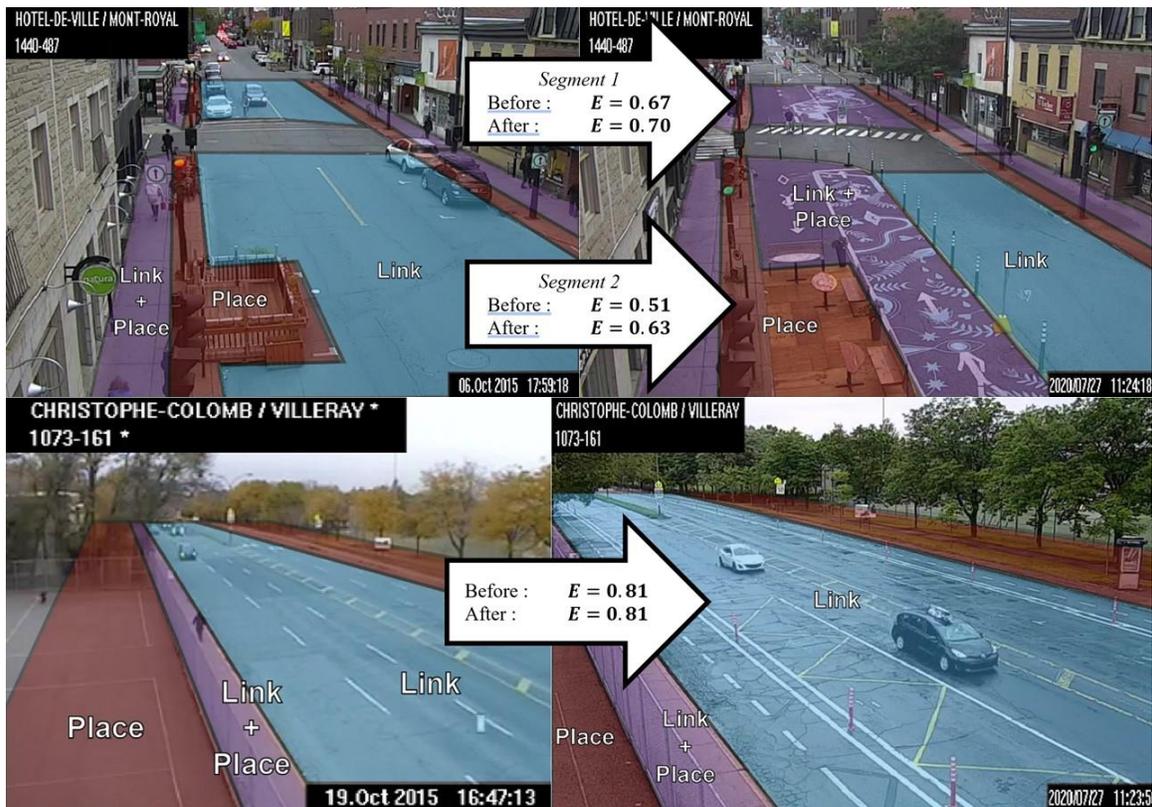


Figure 2-8 : Effet de l'ajout d'une voie piétonnisée et d'une voie cyclable sur l'indice d'entropie de Shannon

2.2.4.6 Écart entre l'offre et la demande en transport

L'utilisation d'un indice d'entropie afin d'évaluer l'équilibre entre les différentes dimensions d'une rue présuppose que la répartition optimale de l'espace entre les dimensions de lien, de lieu et d'environnement est une distribution uniforme, c'est-à-dire que chaque dimension devrait recevoir un tiers de la superficie. De nombreux autres agencements sont toutefois possibles qui pourraient également produire une répartition tout aussi équitable, mais selon un principe d'équité différent. Une de ces définitions possibles de la distribution équitable de l'espace de la rue est une distribution correspondant au profil de la demande (Creutzig et al., 2020). Il est toutefois difficile, avec les bases de données existantes, d'estimer la demande relative aux dimensions du lieu et de l'environnement. Le développement d'un tel cadre est donc, pour les besoins des présents travaux, restreint à la seule dimension de lien, c'est-à-dire aux espaces consacrés à la mobilité des biens et des personnes ainsi qu'au stationnement des véhicules.

Les démarches de ce type recensées dans la littérature sont toutefois limitées : soit elles mesurent le partage de la rue sur un échantillon de quelques tronçons, soit elles comparent l'offre mesurée à la part modale agrégée des différents modes à l'échelle d'une ville (Colville-Andersen, 2018; Creutzig et al., 2020; Gössling et al., 2016; Nello-Deakin, 2019). Pourtant, l'offre et la demande varient grandement selon le type de milieu au sein d'une même ville. Les présents travaux cherchent donc à évaluer l'écart offre-demande à des échelles plus réduites, à savoir les échelles de l'arrondissement et du corridor de rues.

Pour ce faire, la demande sur chaque rue du territoire d'étude est estimée en affectant les déplacements de l'Enquête OD 2013 sur le réseau à l'aide du calculateur OSRM (auto, vélo, marche) et de l'algorithme trRouting (transport collectif). Il est à noter que les segments piétons des déplacements effectués en transport collectif (et en automobile, pour une partie des calculs) sont estimés et ajoutés aux déplacements piétons. La figure 2-9 représente la part modale des passagers-kilomètres parcourus (PKP) sur le territoire d'étude pour une journée moyenne d'automne.

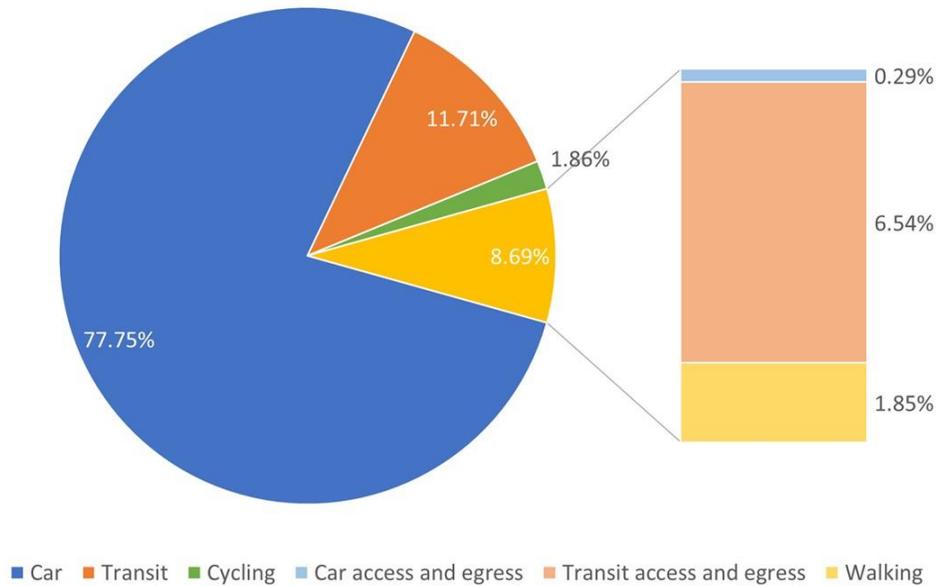


Figure 2-9 : Passagers-kilomètres parcourus (PKP) sur le territoire d'étude selon le mode, profil de demande observée, Enquête OD 2013

Comparaison offre-demande à l'échelle de l'arrondissement

Pour ce faire, la demande pour chaque mode (M), à l'échelle de chacun des arrondissements (B) du territoire d'étude, se définit comme suit :

$$PKT_{B,M} = \sum_{i|m_i=M} \ell(g_i \cap g_B) * W_i$$

Où i est un déplacement répertorié dans l'Enquête OD 2013, m_i son mode déclaré, W_i son facteur d'expansion et g_i la géométrie linéaire de son itinéraire calculé, tandis que g_B représente la géométrie polygonale de l'arrondissement B et $\ell(\dots)$ représente le calcul de la longueur linéaire d'un tracé.

Un indicateur d'écart entre l'offre et la demande (« *needs-gap* ») pour chaque mode M et arrondissement B est ensuite calculé comme suit :

$$G_{B,M} = \%S_{B,M} - \%PKT_{B,M}$$

Où $\%S_{B,M}$ représente la part de la superficie des rues de l'arrondissement B consacrée au mode M et $\%PKT_{B,M}$ la part de la demande calculée précédemment consacrée au même mode dans le même arrondissement. Le résultat est donc un indicateur variant théoriquement de -100 à +100, où 0 indique une adéquation parfaite entre la part de la superficie des rues d'un arrondissement allouée à un mode donné et la part de la demande représentée par ce mode. Une valeur positive

indique que le mode visé obtient une part de l'espace des rues qui est plus grande que son poids dans la demande, tandis qu'une valeur négative indique au contraire une sous-représentation du mode dans l'espace par rapport à son poids observé dans la demande.

Comparaison offre-demande à l'échelle du corridor

Afin d'obtenir un portrait plus détaillé, l'approche de l'indice d'écart offre-demande est également appliquée à l'échelle des corridors de rues, les limites inhérentes à la structure et à l'échantillonnage de l'Enquête OD ainsi qu'aux outils d'affectation réseau employés ne permettant pas pour l'instant d'appliquer cette démarche à l'échelle de chaque tronçon de rue.

Pour les fins des présents travaux, un corridor de rues est défini comme un ensemble de rues parallèles et pouvant vraisemblablement être considérées comme des alternatives. Afin de construire les corridors au sein du territoire d'étude, les rues sont tout d'abord agrégées en axes. Pour ce faire, tous les tronçons successifs d'une même rue situés au sein d'un même arrondissement et étant caractérisés par une limite de vitesse similaire (30 km/h et moins, 40 à 50 km/h, 60 km/h et plus) sont agrégés en axes. Pour chaque axe, les axes voisins parallèles situés dans un rayon de 400 mètres et mesurant au moins 75 % de la longueur de l'axe de référence sont considérés comme faisant partie du même corridor (voir figure 2-10).

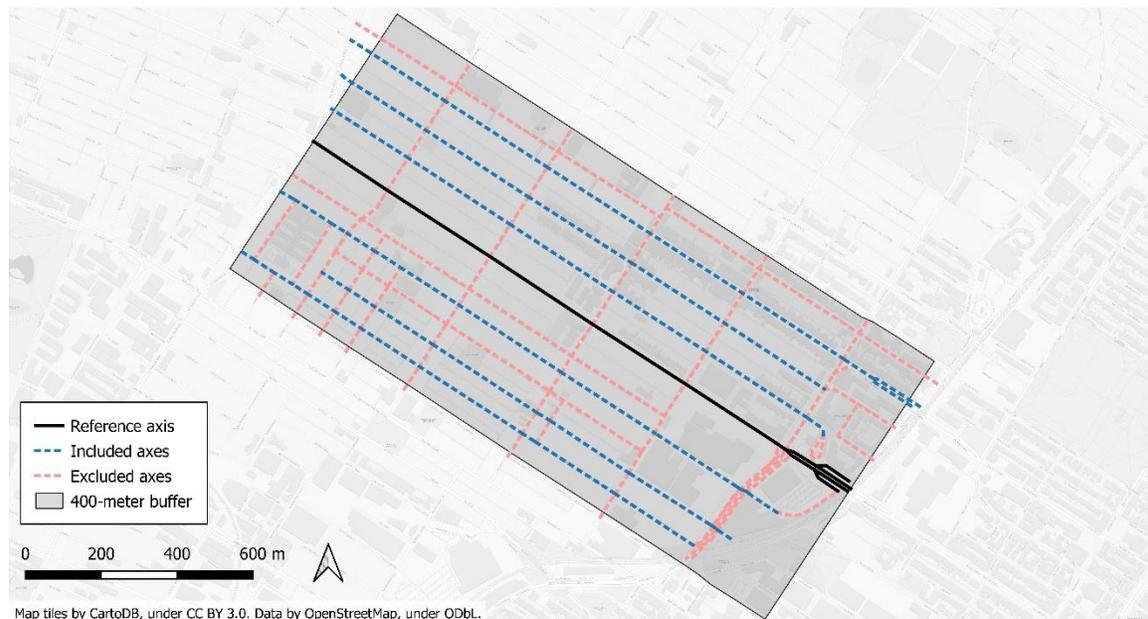


Figure 2-10 : Identification des axes faisant partie d'un corridor

L'indicateur d'écart offre-demande G pour chaque mode M est ensuite appliqué selon les mêmes paramètres qu'à la section précédente, mais en considérant seulement l'offre et la demande à l'échelle des rues faisant partie du corridor C :

$$G_{C,M} = \%S_{C,M} - \%PKT_{C,M}$$

Demande potentielle

Il est important de souligner que la demande mesurée sur le réseau est, au moins en partie, fonction de la manière dont le réseau lui-même est structuré. Ainsi, il est important de comparer l'offre non seulement avec la demande observée, mais également avec un profil de demande permettant de représenter la demande potentielle. À cette fin, deux algorithmes sont employés afin d'identifier, tout d'abord, les déplacements motorisés de l'Enquête OD 2013 qui pourraient

être réalisés de manière plausible à l'aide d'un mode actif, puis les déplacements réalisés en automobile qui pourraient être réalisés en transport collectif. Le premier algorithme identifie les déplacements motorisés qui pourraient plausiblement être réalisés à pied ou à vélo en fonction de leur longueur et du profil sociodémographique du répondant ainsi que du motif du déplacement et de critères relatifs à l'ensemble de la chaîne de déplacements (se référer à Morency et al., 2019 pour la méthode détaillée). Le deuxième algorithme identifie, au sein des déplacements automobiles restants, ceux qui pourraient plausiblement être réalisés en transport collectif en fonction d'un ratio de compétitivité R calculé comme suit :

$$R = \frac{t_{TC}}{t'_{auto}}$$

Où t_{TC} représente le temps de parcours en transport collectif pour une paire origine-destination, incluant les temps d'accès à pied, tandis que t'_{auto} représente plutôt le temps de la portion en véhicule du trajet, ignorant le temps d'accès à l'origine et à la destination. Les déplacements retenus comme étant transférables au transport collectif sont ceux dont le ratio R est inférieur au 80^e centile observé dans l'Enquête OD du ratio R des déplacements déclarés en transport collectif pour le genre et le groupe d'âge du répondant.

Deux profils de demande potentielle ont été créés au fil des présents travaux (voir tableau 2-2).

Tableau 2-2 : Déplacements retenus pour chacun des deux profils de demande potentielle

Mode déclaré	Transférables à la marche et/ou au vélo?	Transférables au TC?	Profil 1	Profil 2
Marche	-	-	Marche	Marche
Vélo	-	-	Vélo	Vélo
Auto/TC	Oui	-	Marche/vélo ²	Marche/vélo
TC	Non	-	TC	TC
Accès piéton au TC	Non	-	Marche	Marche
Auto	Non	Oui	Auto	<u>TC</u>
Auto	Non	Non	Auto	Auto
Accès piéton à l'auto	Non	Non	-	<u>Marche</u>

NB :

La figure 2-11 illustre la part modale des PKP sur le territoire d'étude lors d'une journée moyenne de semaine d'automne pour le profil 2. Une comparaison avec la figure 2-9, qui représente les PKP observés, permet de constater que près de 25 % des PKP déclarés en automobile peuvent vraisemblablement être parcourus en transport collectif selon les paramètres établis. Cela a pour effet d'augmenter fortement la part modale du TC dans le profil de demande potentielle, mais

² Si un déplacement motorisé est transférable à la fois à la marche et au vélo, le facteur d'expansion du déplacement est réparti entre les deux modes selon une procédure de chevauchement (se référer à Morency et al., 2019).

également de doubler la part modale de la marche en raison des accès piétons à ces nouveaux déplacements de TC.

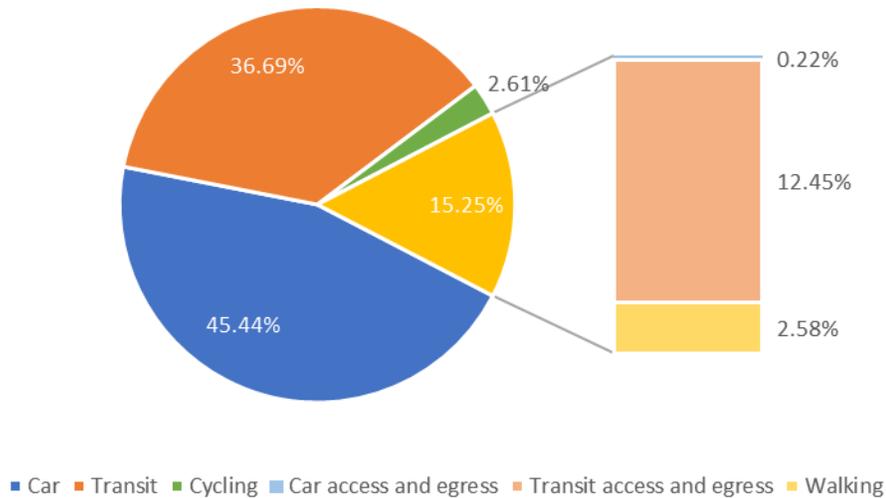


Figure 2-11 : Passagers-kilomètres parcourus (PKP) sur le territoire d'étude selon le mode, profil de demande potentielle (2), Enquête OD 2013

Application d'un indicateur d'écart offre-demande sufficientariste

Les indicateurs d'écart offre-demande présentés ci-haut considèrent qu'un partage de la rue équitable correspond à une situation où la part de l'espace consacrée à chaque mode est équivalente à sa part modale (observée ou potentielle) pondérée par la distance parcourue. Cela correspond à une perspective égalitariste.

Toutefois, il est possible d'envisager d'autres principes de justice distributive qui pourraient être appliqués dans le partage des rues. Par exemple, il serait possible de considérer qu'une quantité d'espace minimale devrait être accordée à chaque mode, dans une perspective sufficientariste. L'espace excédentaire pourrait ensuite être réparti au prorata de la part modale (observée ou potentielle).

Un indicateur sufficientariste de ce type est donc appliqué à l'échelle des corridors de rues, en plus de l'indicateur égalitariste $G_{C,M}$. L'indicateur sufficientariste $G'_{C,M}$ est calculé pour chaque mode M à l'échelle de chaque corridor de rues C comme suit :

$$G'_{C,M} = \% (S_{C,M} - L_C \mu_{C,M}) - \% PKT_{C,M}$$

Où S_M représente la superficie allouée au mode M , $\mu_{C,M}$ la largeur minimale possible pour une voie desservant ce mode (1.8 m pour les piétons et les cyclistes, 3 m pour les automobiles et 3,5 m pour les voies réservées au TC) et L_C la longueur du corridor.

2.2.5 Résultats

2.2.5.1 Partage de l'espace de voirie selon l'arrondissement

La figure 2-12 montre la part d'espace de rue allouée à chaque mode et l'utilisation de la rue dans les 11 arrondissements de la zone d'étude pendant la demi-heure de pointe du matin (8 h 00 à 8 h 30). La superficie allouée à l'usage exclusif des cyclistes et du transport en commun est très faible sur l'ensemble de la zone d'étude, allant de 0,5 % (Saint-Léonard) à 3,2 % (Rosemont–

La Petite-Patrie). En revanche, la moitié de la superficie totale de chaque arrondissement (48 % à 55 %) est allouée aux conducteurs en période de pointe AM, ainsi qu'entre 14 % à 18 % au stationnement des véhicules sur voirie (sauf dans les arrondissements Ville-Marie et Outremont, où cette proportion tombe à 7 % de la superficie totale des rues, probablement en raison de la conversion des voies de stationnement en voies de circulation en période de pointe). Les arrondissements périphériques de Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles, Ahuntsic-Cartierville et Saint-Léonard, ainsi que les quartiers centraux de Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce et de Mercier–Hochelaga-Maisonneuve, allouent moins de surface de rue à l'infrastructure piétonne exclusive [P] que la moyenne de 15,4 % pour la zone d'étude. Ces arrondissements fournissent également aux usagers de la rue quelques banquettes plantées. Globalement, les arrondissements Saint-Léonard et Outremont sont ceux qui offrent le moins d'espace dédié aux cyclistes, ce qui explique la part inversement proportionnelle de l'espace partagé entre les cyclistes et les conducteurs [CD]. L'arrondissement de Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles, une zone majoritairement suburbaine, affiche la plus forte proportion d'espace de rue partagé entre piétons, cyclistes et conducteurs [PCD], indiquant que plusieurs rues résidentielles de l'arrondissement ne disposent d'aucune infrastructure piétonnière dédiée. En revanche, la présence importante d'espaces PCD dans Le Sud-Ouest et Ville-Marie est principalement due à la présence de zones industrielles et de voies de desserte et à l'absence de trottoirs sur le réseau routier du parc Jean-Drapeau. Il est à noter qu'une piste cyclable est présente sur le circuit de Formule 1 de la ville, mais ce tracé n'apparaît pas dans le jeu de données de l'inventaire routier car il n'est séparé de la circulation automobile que par des bornes temporaires. Il s'agit d'une limitation connue des outils de détection d'allocation de surface de rue utilisés dans les présents travaux.

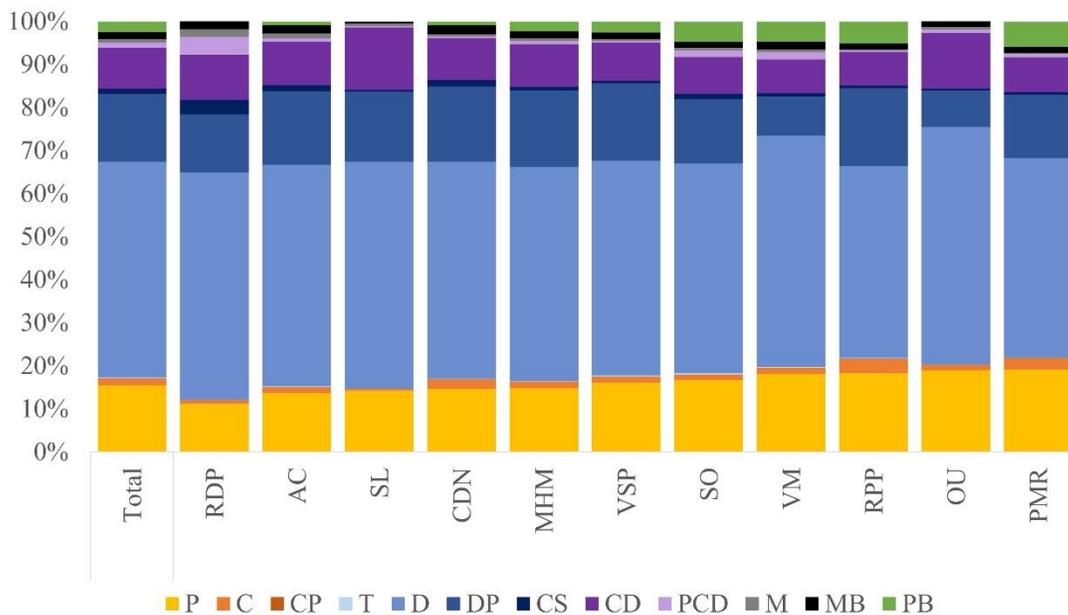


Figure 2-12 : Répartition de l'espace de voirie selon le mode ou la combinaison de modes, période de pointe AM, jour moyen de semaine d'automne

2.2.5.2 Évolution du partage de la rue au cours d'une journée

L'allocation des espaces de voirie est dynamique et peut varier selon le mois, le jour ou même l'heure de la journée. Les règles de stationnement et les paramètres d'opération des voies

réservées au transport collectif peuvent avoir un effet important sur la répartition de l'espace dans la rue au cours d'une journée. La figure 2-13 illustre la variation de la superficie totale des différents usages de la chaussée pendant 4 périodes en semaine (lundi 3 septembre 2018) dans l'arrondissement Ville-Marie. La période de référence dans ce graphique est la première période, de 4 h 00 à 4 h 30.

La plus grande variation dans le partage de la rue pour les modes motorisés se produit pendant la période de pointe du matin. À 8 h 00, la capacité de stationnement sur rue de l'arrondissement Ville-Marie est diminuée de 27 %, soit un peu plus de 6 300 places de stationnement. La majeure partie de cet espace, qui représente plus de 300 hectares d'espace public, est dédiée aux automobilistes, en ajoutant des voies de circulation supplémentaires sur plusieurs rues du centre-ville. Une légère augmentation des autres usages de la voie de rive [CS] est également visible, une catégorie qui comprend les zones de livraison et d'autres types de restrictions de stationnement.

La plupart de cet espace retourne au stationnement des conducteurs après la période de pointe du matin. Les périodes de pointe du midi et de l'après-midi semblent moins dépendre de la réduction de l'espace de stationnement pour accueillir les conducteurs, avec respectivement 85 et 135 hectares de surface de rue, soit environ 2 000 et 3 000 places de stationnement, transférés aux conducteurs.

À titre de comparaison, la superficie totale allouée aux voies réservées en période de pointe AM et PM sur l'ensemble de l'arrondissement représente environ 6 % et 12 % de l'espace supplémentaire alloué aux conducteurs, respectivement. Cela contraste avec la part modale des deux modes, les trajets en bus au départ ou à destination du centre-ville pour les mêmes périodes représentant 28 % de tous les déplacements motorisés sur rue (voitures et bus) produits ou attirés par le quartier.

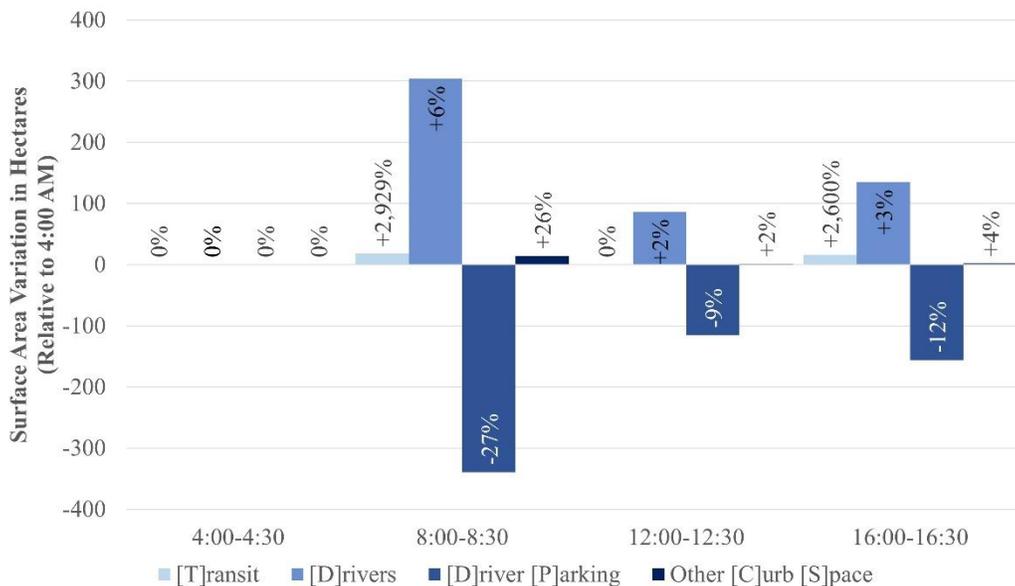


Figure 2-13 : Variation de l'allocation de l'espace de voirie au cours d'une journée de semaine d'automne, arrondissement Ville-Marie

2.2.5.3 Équilibre entre les différentes dimensions de la rue

La figure 2-14 montre que l'espace de la rue semble être réparti à peu près également entre les dimensions de lien, de lieu et d'environnement dans la majorité des rues du territoire à l'étude. Près de 40 % des tronçons de rue (70 % de la longueur du réseau de la zone d'étude) obtiennent un score d'entropie supérieur à 0,95, ce qui correspond à une situation où l'une des deux dimensions occupe deux fois plus d'espace que les deux autres dimensions. Les tronçons de rue caractérisés par des scores d'entropie inférieurs à 0,5 – ce qui correspond à une situation où une dimension occupe 75% de l'espace et une autre 25% tandis que la troisième est absente – sont les rues industrielles et les autoroutes, mais aussi certaines collectrices et artères ainsi que de nombreuses rues du centre-ville. Dans plus de 85 % des cas, ce faible score est dû à l'absence d'espace alloué à la dimension environnementale. Les quartiers centraux, plus anciens et caractérisés par une emprise étroite ainsi que des marges peu profondes, voire inexistantes, figurent également parmi les scores les plus bas. Les développements plus récents dans les arrondissements périphériques, en revanche, présentent généralement des marges plus larges et plus de végétation, ce qui semble les aider à obtenir un score d'entropie plus élevé. Comme le montre la figure 2-15, la plupart de ces mesures ont un impact modeste sur l'équilibre entre les dimensions fondamentales de la rue.

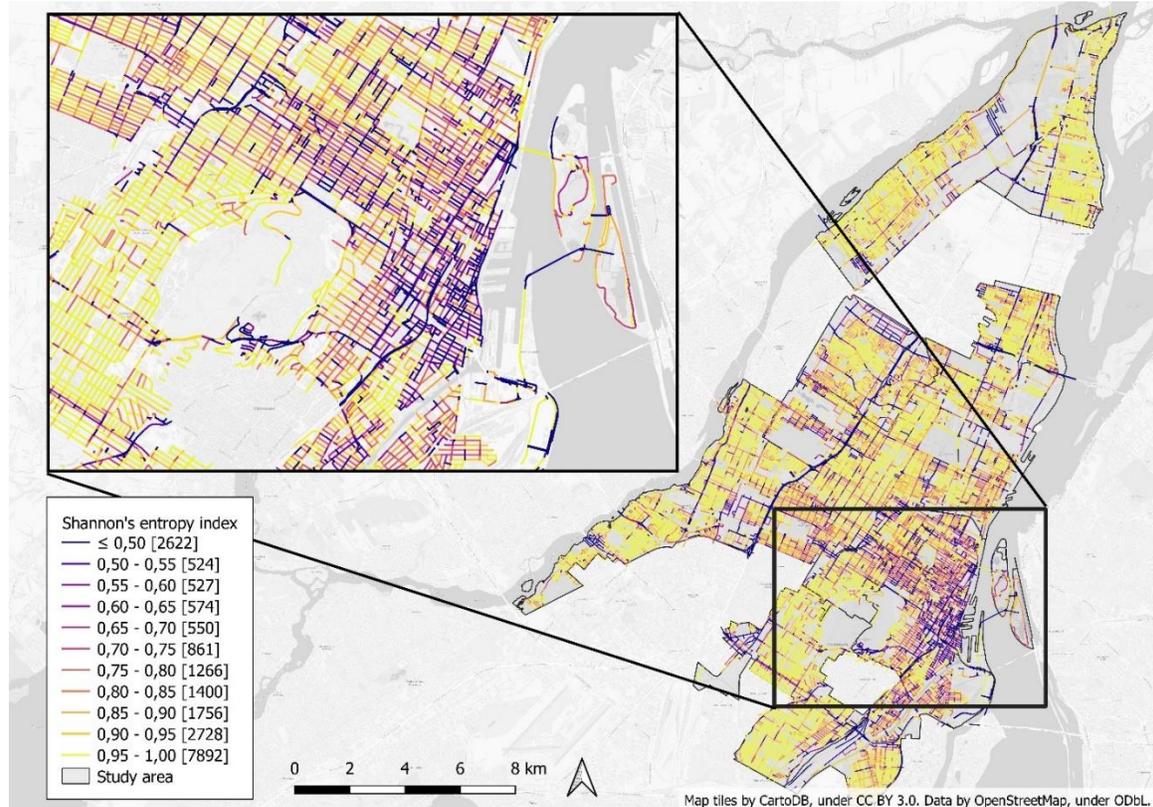


Figure 2-14 : Équilibre de la distribution de l'espace des rues du territoire d'étude entre les dimensions de lien, de lieu et d'environnement

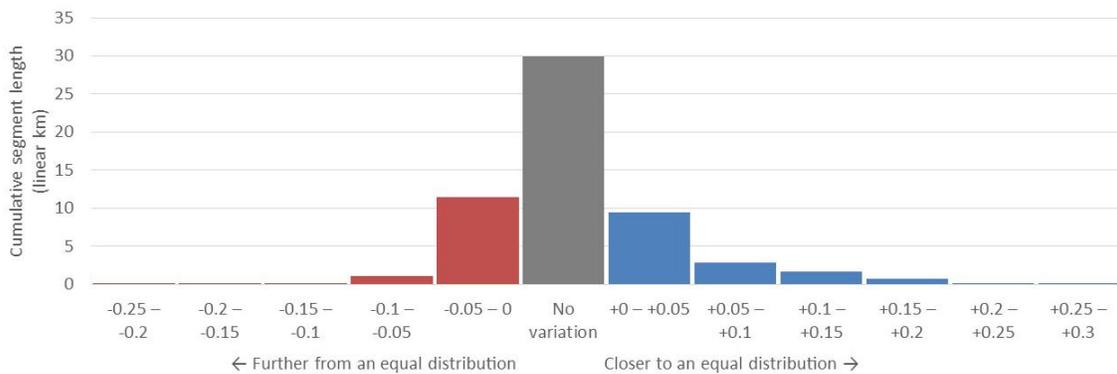


Figure 2-15 : Variation de l'indice d'entropie de Shannon à la suite de la mise en place des corridors sanitaires durant la pandémie de COVID-19 (2020) par rapport à la situation de référence (2018)

2.2.5.4 Écart entre l'offre et la demande en transport selon l'arrondissement

L'écart entre l'offre et la demande en transport n'est pas uniforme à travers le territoire d'étude. Le tableau 2-3 et la figure 2-16 présentent l'écart offre-demande pour chaque mode (G_i) pour le territoire d'étude ainsi que dans chacun des 11 arrondissements. L'offre et la demande de transport dans ce contexte s'entendent respectivement comme la portion de la superficie de voirie allouée à un mode donné (S_i) pour la période de 8 h 00 à 8 h 30 à la date de référence et le profil de demande du mode correspondant (D_i) pour les déplacements observés ou potentiels intersectant l'arrondissement en période de pointe du matin (6 h 00 à 9 h 00).

La proportion de la surface de voirie allouée aux piétons sur l'ensemble de la zone d'étude est supérieure à la part observée de PKP piétons, tandis que la proportion d'espace cyclable exclusif est de 50 % inférieure à la part observée de PKP cyclistes. Lorsqu'on s'attarde aux espaces de transport en commun exclusifs, c'est-à-dire les voies prioritaires pour les bus, ils représentent une maigre portion de 0,2 % de la surface totale de la voirie du territoire d'étude, tandis que les usagers de bus représentent 14 % des PKP observés. Cela conduit à un écart majeur dans l'indice d'écart offre-demande. À l'inverse, la part de la superficie de voirie allouée aux automobilistes (et aux passagers) est supérieure à la demande observée associée.

Lorsqu'on regarde le profil de la demande potentielle³, qui représente le potentiel de modes actifs pour les déplacements enregistrés dans l'Enquête OD 2013, l'écart devient plus évident: la part de l'offre d'espace dédiée à la marche est toujours supérieure à sa part de la demande potentielle, mais l'espace cyclable est notablement sous-représenté avec un écart de 7 points de pourcentage. En raison du transfert de certains trajets motorisés vers des modes actifs, l'écart offre-demande est réduit pour le transport en commun mais augmenté pour les conducteurs.

L'écart offre-demande entre l'offre d'espace cyclable et la demande observée est positif dans quatre arrondissements: Ahuntsic-Cartierville et Côte-des-Neiges–Notre-Dame-de-Grâce, arrondissements centraux denses, ainsi que Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles et Saint-Léonard, arrondissements plus suburbains, ce qui signifie que l'espace exclusivement cyclable est surreprésenté par rapport à la part observée des PKP attribuable aux cyclistes. Dans tous les autres arrondissements, cette relation est inversée: l'espace cyclable exclusif est sous-représenté

³ Le profil 1 est employé pour cette analyse, c'est-à-dire sans transférer de déplacements de l'auto vers le TC (se référer au tableau 2-2 de la section 2.2.4.6)

par rapport à la part des PKP observés attribuable aux cyclistes. Ce phénomène apparaît le plus clairement dans l'arrondissement Le Plateau-Mont-Royal, un arrondissement dense et mixte adjacent au centre-ville où l'on retrouve la plus forte proportion de PKP cyclables observés (10,3%). L'étude du profil de demande potentielle pour le cyclisme renforce ce constat, l'écart atteignant plus de 15 points de pourcentage dans 3 arrondissements à fort potentiel cyclable (Outremont, Le Plateau-Mont-Royal et Rosemont–La Petite-Patrie).

Tableau 2-3 : Écart offre-demande dans les rues du territoire d'étude selon l'arrondissement, heure de pointe du matin lors d'une journée moyenne de semaine d'automne

P = Piétons C = Cyclistes		T = Transport collectif D = Automobilistes		Demande (D_i) % DES PKP				Offre (S_i) % DE LA SURFACE				Écart offre-demande (G_i) POINTS DE POURCENTAGE			
Arrondissement	Demande	P	C	T	D	P	C	T	D	P	C	T	D		
STUDY AREA	Observée	7.4	2.7	14.0	75.9	16.4	1.8	0.2	81.6	+ 9.0	- 0.9	- 13.8	+ 5.6		
	Potentielle	8.0	9.3	11.6	71.2	"	"	"	"	+ 8.4	- 7.4	- 11.4	+ 10.4		
Ahuntsic-Cartierville	Observée	4.1	1.4	13.6	80.9	14.4	1.5	0.3	83.8	+ 10.3	+ 0.1	- 13.3	+ 2.9		
	Potentielle	4.5	6.4	11.5	77.5	"	"	"	"	+ 9.9	- 5.0	- 11.2	+ 6.2		
Côte-des-Neiges– Notre-Dame-de-Grâce	Observée	10.0	1.8	9.9	78.2	15.3	2.5	0.1	82.1	+ 5.3	+ 0.6	- 9.9	+ 3.9		
	Potentielle	10.9	10.2	6.6	72.3	"	"	"	"	+ 4.5	- 7.7	- 6.5	+ 9.8		
Mercier–Hochelaga- Maisonneuve	Observée	5.5	1.2	13.2	80.2	15.6	1.7	0.1	82.6	+ 10.2	+ 0.5	- 13.1	+ 2.4		
	Potentielle	5.9	6.1	11.8	76.3	"	"	"	"	+ 9.8	- 4.3	- 11.8	+ 6.3		
Outremont	Observée	11.7	6.1	9.7	72.5	19.4	1.3	0.0	79.3	+ 7.7	- 4.8	- 9.7	+ 6.8		
	Potentielle	13.2	22.0	4.4	60.5	"	"	"	"	+ 6.2	- 20.6	- 4.4	+ 18.8		
Le Plateau-Mont-Royal	Observée	11.0	10.3	9.6	69.2	20.8	2.9	0.1	76.1	+ 9.8	- 7.3	- 9.5	+ 7.0		
	Potentielle	11.9	18.9	4.6	64.6	"	"	"	"	+ 8.9	- 16.0	- 4.5	+ 11.5		
Rivière-des-Prairies– Pointe-aux-Trembles	Observée	2.5	0.3	14.0	83.2	12.0	1.0	0.0	87.0	+ 9.5	+ 0.7	- 14.0	+ 3.8		
	Potentielle	2.9	4.3	12.9	79.9	"	"	"	"	+ 9.1	- 3.3	- 12.9	+ 7.1		
Rosemont– La Petite-Patrie	Observée	8.6	5.8	19.7	65.9	19.8	3.6	0.2	76.4	+ 11.1	- 2.2	- 19.5	+ 10.5		
	Potentielle	9.8	18.4	14.2	57.7	"	"	"	"	+ 10.0	- 14.8	- 13.9	+ 18.7		
Saint-Léonard	Observée	4.1	0.3	15.2	80.4	14.4	0.5	0.1	85.0	+ 10.3	+ 0.1	- 15.1	+ 4.6		
	Potentielle	5.0	10.9	12.5	71.6	"	"	"	"	+ 9.4	- 10.4	- 12.4	+ 13.4		
Le Sud-Ouest	Observée	4.1	2.3	22.0	71.6	18.2	1.3	0.4	80.1	+ 14.1	- 0.9	- 21.6	+ 8.4		
	Potentielle	4.4	7.3	21.3	67.0	"	"	"	"	+ 13.8	- 6.0	- 20.9	+ 13.1		
Ville-Marie	Observée	14.7	4.4	12.8	68.2	19.6	1.6	0.2	78.6	+ 4.9	- 2.7	- 12.6	+ 10.4		
	Potentielle	15.2	9.4	11.2	64.2	"	"	"	"	+ 4.4	- 7.7	- 11.0	+ 14.3		
Villeray–Saint-Michel– Parc-Extension	Observée	7.5	2.2	12.7	77.5	16.9	1.6	0.2	81.3	+ 9.3	- 0.7	- 12.5	+ 3.8		
	Potentielle	8.4	9.3	9.7	72.7	"	"	"	"	+ 8.5	- 7.7	- 9.4	+ 8.6		

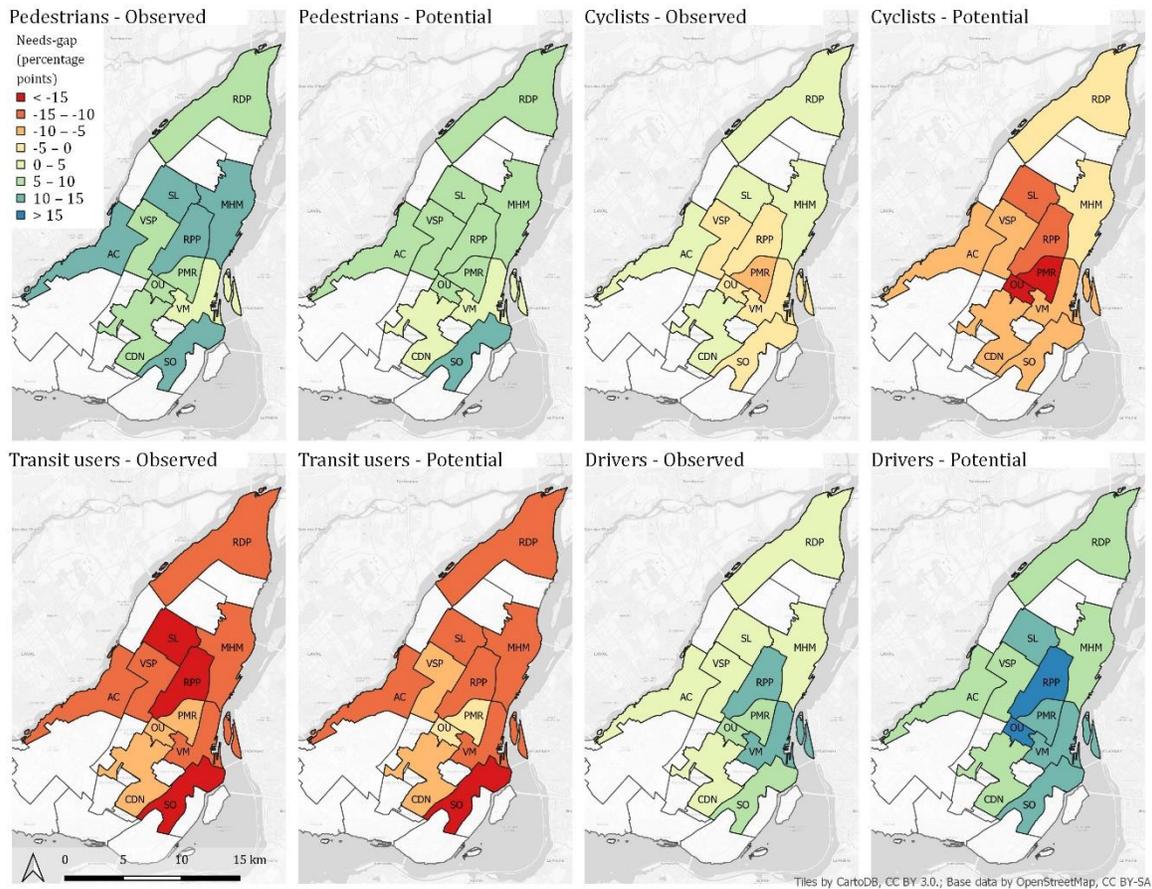


Figure 2-16 : Distribution spatiale de l'écart offre-demande selon le mode, période de pointe de l'avant-midi, jour moyen de semaine d'automne

La figure 2-17 montre un exemple de comparaison entre l'offre et la demande de transport dans l'arrondissement de Ville-Marie pour les profils de demande observée et potentielle. En période de pointe du matin, 78,6 % de l'espace de voirie dédié aux usages de transport (excluant les banquettes et terre-pleins) est alloué aux conducteurs, qu'ils soient stationnés ou en mouvement. Un autre 19,6 % est alloué exclusivement aux piétons, tandis que le reste est réparti entre les cyclistes (1,6 %) et les usagers du transport collectif (0,2 %).

En comparaison, les conducteurs et leurs passagers représentent 68,2 % de l'ensemble des passagers-kilomètres parcourus (PKP) observés dans l'arrondissement et les piétons, 12,8 %. Les cyclistes représentent 4,4 % des PKP observés, une valeur environ 4 fois supérieure au pourcentage de la surface de la rue qui leur est exclusivement alloué. L'écart entre les PKP et l'espace de la rue est encore plus grand si l'on considère les PKP cyclables potentiels, c'est-à-dire les déplacements à vélo observés ainsi que les trajets motorisés qui pourraient vraisemblablement être effectués à vélo. Les PKP cyclables potentiels représentent 9,4 % du total des PKP potentiels à la pointe du matin dans l'arrondissement de Ville-Marie, soit près de 10 fois plus que la portion de la voie publique réservée aux vélos stationnés ou en mouvement. À l'inverse, la part de l'espace de rue allouée aux piétons est plus importante que la proportion de PKP piétons observés et potentiels.

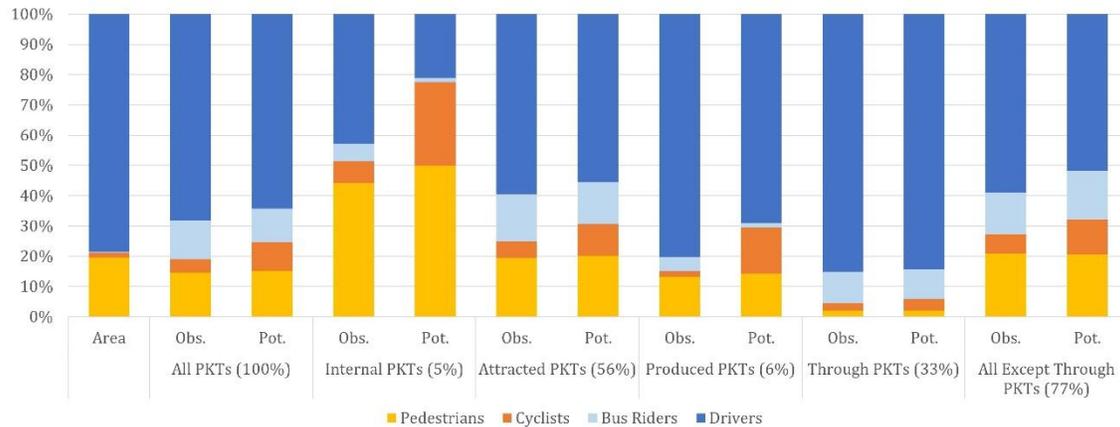


Figure 2-17 : Écart offre-demande selon l'origine et la destination des déplacements, arrondissement Ville-Marie, heure de pointe de l'avant-midi, jour moyen de semaine d'automne

L'analyse de la provenance des déplacements apporte une certaine nuance à ces résultats. Lorsqu'on ne regarde que les PKP internes, par exemple, c'est-à-dire les PKP générés par les déplacements entièrement effectués dans le même arrondissement, la relation entre l'offre et la demande est modifiée. Pour tous les arrondissements (sauf Rivière-des-Prairies–Pointe-aux-Trembles), la part d'espace de voirie allouée aux piétons est inférieure à la part des PKP (observée et potentielle) représentée par les piétons. Dans Ville-Marie, comme le montre la figure 2-17, 44,2 % des PKP internes observés sont réalisés par des piétons en période de pointe AM, ce qui est plus de deux fois supérieur à la proportion d'espace de rue qui leur est consacrée.

Lorsque l'on exclut seulement les déplacements traversants, le portrait diffère selon qu'on s'attarde aux arrondissements centraux ou périphériques. Par exemple, dans les arrondissements centraux, la proportion de PKP piétons observés et potentiels est plus élevée que la part de la surface de voirie correspondante, alors que l'inverse est vrai pour les arrondissements périphériques.

2.2.5.5 Écart entre l'offre et la demande en transport à l'échelle des corridors

La figure 2-18 montre le résultat du calcul de l'indice d'écart offre-demande G_1 au niveau du corridor en utilisant les données de demande de 2013. Celui-ci correspond à l'indicateur appliqué dans la section précédente pour le profil de demande observée⁴. Les données d'offre spatiale correspondent à l'allocation d'espace moyenne pour le mode ciblé dans un corridor donné le lundi 1er octobre 2018 pendant la période de pointe du matin (5h à 9h). La variation de l'indice d'écart offre-demande entre les différentes périodes de la journée (pointe AM, midi, pointe PM et soirée) étant minime, seuls les résultats de pointe AM sont présentés ici.

Il semble y avoir un solde négatif notable en ce qui a trait à l'espace consacré au TC dans les quartiers périphériques ainsi que dans les grands couloirs menant au centre-ville ou vers le métro. L'espace cyclable semble être plus ou moins au même niveau que la demande observée pour un jour de semaine d'automne moyen, à l'exception de certains corridors est-ouest (Sherbrooke et Saint-Grégoire, principalement). L'espace consacré aux piétons dans le centre-ville semble correspondre à la part de la demande observée attribuable aux piétons, sauf pour certains courts

⁴ Le profil 2 est employé pour cette analyse, c'est-à-dire que les déplacements auto transférables vers le TC sont comptabilisés comme des déplacements TC (se référer au tableau 2-2 de la section 2.2.4.6)

corridors spécifiques, alors qu'il semble y avoir un solde positif d'espace piétonnier dans une grande partie du territoire d'étude. Quant à l'espace automobile, l'indice G_1 indique un solde négatif par rapport à la demande observée en pointe en AM dans les quartiers centraux entourant le centre-ville.

Le solde positif apparent de l'espace piétonnier peut sans doute s'expliquer en partie par l'espace minimal nécessaire pour construire un trottoir selon les normes nord-américaines. Par exemple, la Ville de Montréal recommande que le corridor piéton d'un trottoir soit d'au moins 1,8 mètre de largeur (Ville de Montréal, 2017a). La même logique s'applique à une voie de circulation, par exemple, qui doit être d'au moins 3 mètres de largeur dans la plupart des cas (NACTO, 2013). L'utilisation d'une approche sufficientariste, c'est-à-dire en ne considérant que l'espace excédentaire alloué à chaque mode (cf. p. 20), permet de réduire la perception du solde positif de l'espace, comme indiqué dans la colonne de gauche de la figure 2-19 (indice G_3).

La figure 2-19 démontre également que l'utilisation du profil de demande potentielle au lieu de la demande observée change radicalement l'évaluation de l'écart offre-demande, en particulier en ce qui concerne le transport en commun et l'automobile. Cela se remarque autant dans une perspective égalitariste (G_2) que sufficientariste (G_4). Lorsqu'on utilise les PKP potentiels au lieu de la demande observée, la plupart des corridors présentent désormais un solde négatif d'espace lié au transport en commun et un solde positif d'espace lié à la voiture. Le solde positif apparent relatif à l'espace piétonnier est également légèrement réduit en raison de l'augmentation des déplacements à pied résultant de l'augmentation importante des déplacements en transport en commun.

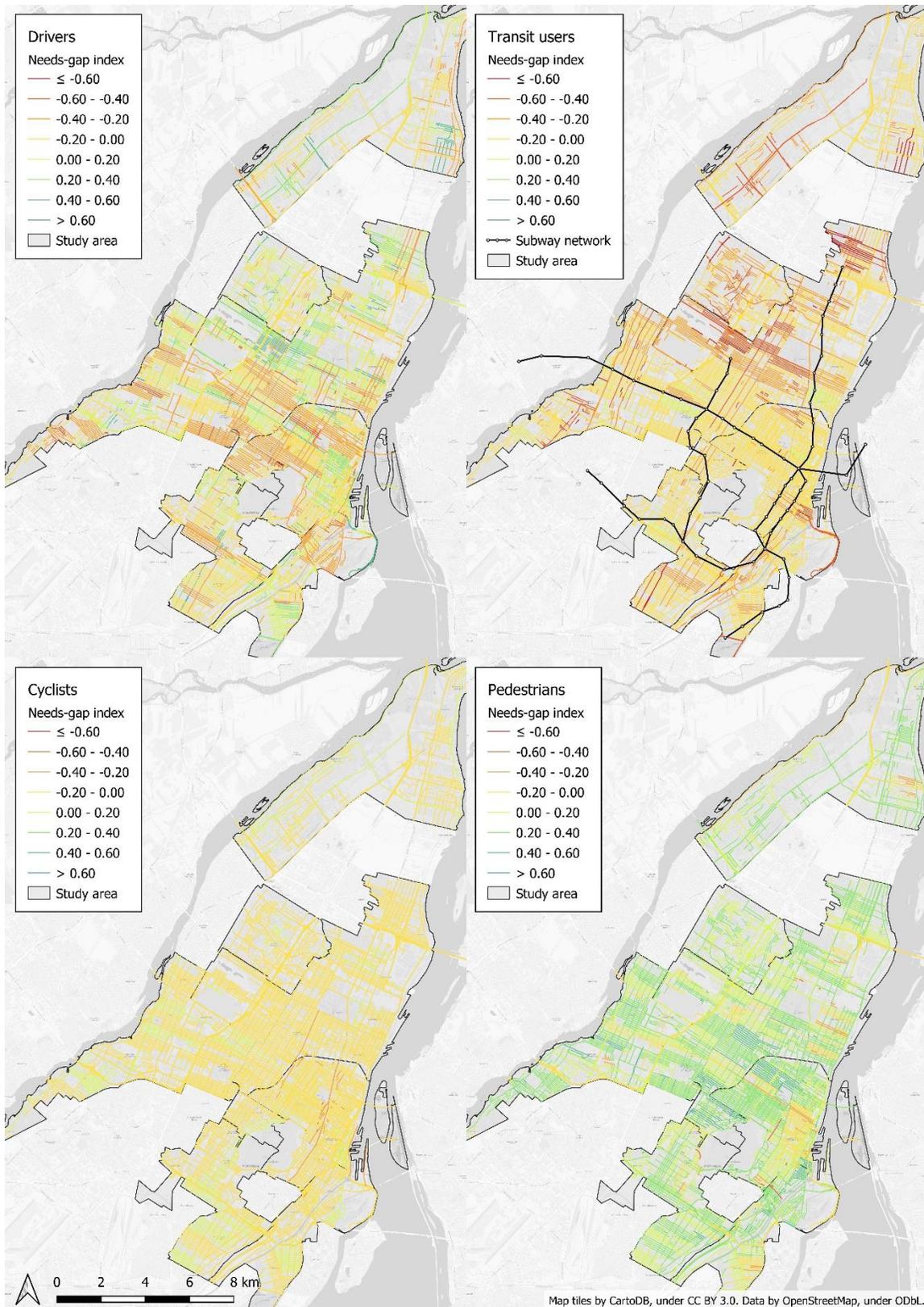


Figure 2-18 : Distribution de l'indice d'écart offre-demande à l'échelle du corridor, demande observée, pointe AM, jour moyen de semaine d'automne

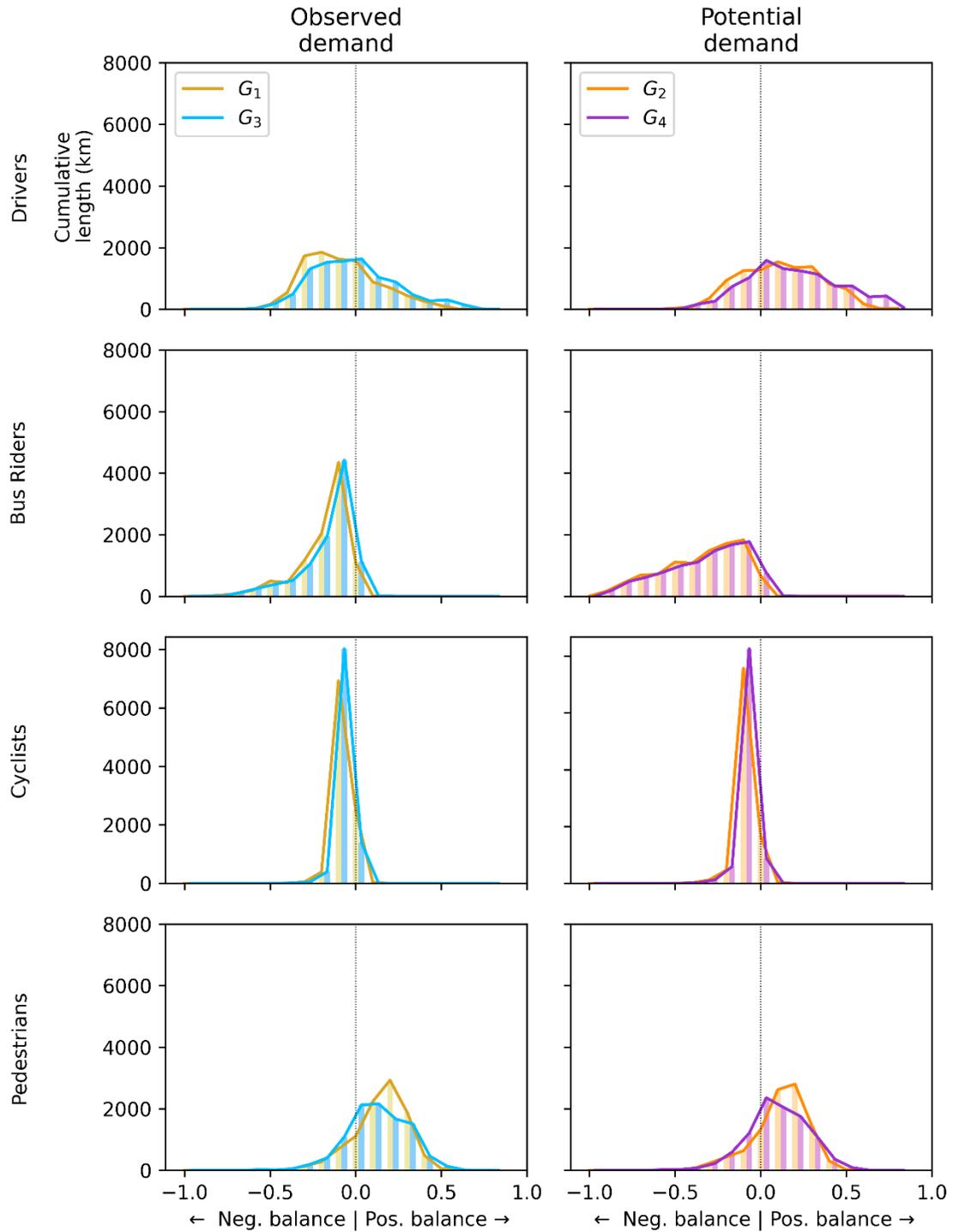


Figure 2-19 : Distribution de l'indicateur d'écart offre-demande à l'échelle du corridor pour l'ensemble du territoire d'étude selon le mode, le profil de demande et le principe de distribution, demande observée, pointe AM, jour moyen de semaine d'automne

2.2.6 Conclusions

2.2.6.1 *Partage de l'espace de voirie selon l'arrondissement*

Le portrait de l'allocation des espaces varie d'un arrondissement à l'autre. La plus grande variation se remarque entre les arrondissements qui font partie de la Ville de Montréal depuis longtemps et les anciennes municipalités de banlieue qui ont fusionné avec la Ville de Montréal au cours des 50 dernières années. La nature dynamique de l'allocation de l'espace de rue est également très importante pour évaluer l'écart entre les besoins de transport et l'offre. Si l'espace piéton exclusif est majoritairement fixe, l'espace alloué aux autres modes peut varier en fonction de l'heure de la journée, de la semaine, du mois ou de l'année. L'allocation dynamique semble actuellement favoriser les conducteurs à destination du centre-ville puisque la superficie totale de la chaussée réallouée du stationnement aux voies de circulation est beaucoup plus importante que celle réallouée aux voies réservées, même si la demande pour ces dernières est bien plus importante. L'analyse de l'attribution des voies de stationnement montre également que si plus d'un quart des espaces de stationnement sur rue du centre-ville sont réaffectés à d'autres fonctions pendant la pointe du matin, seulement la moitié de ce montant est réaffecté pendant la pointe de l'après-midi. Cela peut s'expliquer par une volonté d'équilibrer les besoins des navetteurs avec ceux des acheteurs durant les dernières périodes de la journée.

2.2.6.2 *Équilibre entre les différentes dimensions de la rue*

Les présents travaux montrent le potentiel d'une mesure synthétique pour représenter l'équilibre entre les trois dimensions d'une rue. L'indice d'entropie de Shannon permet d'identifier les rues qui devraient être priorisées par les décideurs souhaitant rétablir l'équilibre dans les rues dominées par leur dimension de lien. Les deux arrondissements du territoire d'étude où l'on retrouve le plus de rues caractérisées par une répartition disproportionnée de l'espace sont Ville-Marie et Le Plateau-Mont-Royal. Cela peut paraître contre-intuitif puisque ces deux arrondissements, respectivement le centre-ville de Montréal et son arrondissement le plus touristique, ont parmi les parts modales les plus élevées pour les modes actifs. On pourrait donc supposer que leurs rues offrent un mélange attrayant de fonctions. Ce constat peut cependant s'expliquer par le fait qu'il s'agit de quartiers densément construits, ce qui ne laisse pas beaucoup de place à la végétation, que ce soit en marge ou en voirie.

L'utilisation de l'indice d'entropie de Shannon peut créer des distorsions dans la compréhension de la répartition de l'espace entre les différentes dimensions, car il n'augmente pas linéairement. Par exemple, une rue hypothétique où la répartition entre les trois dimensions est {0%, 0%, 100%} donne un score de 0,00, mais une configuration de type {0%, 10%, 90%}, qui semble encore intuitivement disproportionnée, reçoit un score de 0,30. À l'autre extrémité du spectre, une configuration {40%, 30%, 30%} reçoit un score de 0,99 tandis qu'une configuration {40%, 40%, 20%} reçoit un score de 0,96. Cela signifie que la même intervention (une réaffectation de 10% de la plus grande à la plus petite catégorie, dans l'exemple ci-dessus) dans une rue à faible score aura un impact estimé beaucoup plus important que dans une rue à score élevé. Bien que cela puisse refléter l'ampleur perçue de telles améliorations dans une rue déséquilibrée, cela pourrait également induire en erreur des utilisateurs potentiels qui ne connaissent pas le fonctionnement interne de l'entropie de Shannon.

2.2.6.3 *Écart entre l'offre et la demande en transport selon l'arrondissement*

L'observation de l'écart entre l'offre et la demande de transport routier dans les différents arrondissements de la ville de Montréal met en évidence une série de déséquilibres dans l'allocation de l'espace de rue dans la zone d'étude, mais aussi des lacunes dans le cadre méthodologique de l'évaluation de l'allocation de l'espace de rue.

L'observation la plus récurrente est que la part des surfaces voirie de la ville réservée exclusivement aux cyclistes et aux usagers de l'autobus est proportionnellement inférieure à la demande observée dans presque tous les arrondissements. Cela est frappant, d'autant plus que la part modale du vélo est à la hausse sur l'île de Montréal (Vélo Québec, 2016, p. 15) alors que l'utilisation du transport en commun y est parmi les plus fortes en Amérique du Nord (Observatoire Grand Montréal, 2018). De plus, on peut s'attendre à ce que la demande cyclable soit plus élevée en 2018, année de référence pour les ensembles de données utilisés pour mesurer l'allocation de l'espace de rue, qu'en 2013, année de référence pour l'estimation des parts modales. De plus, l'Enquête OD est menée à l'automne et le nombre de ménages interrogés augmente au fur et à mesure que la période d'enquête se poursuit, ce qui tend à biaiser la part modale du vélo vers ses valeurs hivernales (inférieures) (Morency et al., 2015). Le déséquilibre proportionnel de l'allocation exclusive de l'espace cyclable est encore plus grand si l'on considère le potentiel de cyclisme en utilisant le profil de demande potentielle. Cela peut s'expliquer en partie par le fait que seul l'espace cyclable exclusif – sentiers hors-rue, pistes et bandes cyclables sur rue – ne soit pris en compte. L'espace partagé entre les cyclistes et les conducteurs [CD], bien que légalement ouvert aux cyclistes, est souvent évité par certaines catégories de cyclistes car il constitue une installation à haut niveau de stress (Dill et McNeil, 2016). Cependant, cette réticence à rouler dans un espace partagé avec les conducteurs varie en fonction des caractéristiques de la rue (largeur de voie, limitation de vitesse) et de son volume de circulation (Imani et al., 2018), ce qui laisse entrevoir la pertinence de considérer certains espaces partagés dans les analyses ultérieures d'écart offre-demande. La même dynamique est en jeu dans le cas du transport en commun: seules les voies réservées ont été considérées. Cela peut conduire à une distorsion dans l'analyse offre-demande, puisque les bus ont également accès à la chaussée générale. Toutefois, pendant la congestion en période de pointe, les bus circulent à des vitesses commerciales moindres, et donc non compétitives, en l'absence d'infrastructure dédiée.

D'un point de vue méthodologique, l'utilisation d'une mesure d'écart offre-demande apparaît comme une méthode efficace pour représenter l'adéquation entre le partage d'une rue et ses profils de demande actuel et potentiel. L'indice d'écart des besoins modaux ($G_{B,M}$) présenté précédemment doit être interprété avec prudence, en particulier lorsque l'on considère l'espace piéton exclusif. Dans la plupart des arrondissements, la part de la voirie allouée à l'usage exclusif des piétons est supérieure à la part de la demande observée, et même potentielle, représentée par les piétons. Cela pourrait être interprété comme un signe que l'espace piéton de ces arrondissements devrait être transféré à d'autres usagers de la rue, puisqu'on y trouve ce qui pourrait être considéré comme une offre excédentaire d'espace piéton. Une telle conclusion ignorerait des aspects importants de l'espace piéton: les trottoirs, comme les autres infrastructures de transport, font notamment l'objet de normes minimales concernant la largeur du couloir de marche qui garantissent leur sécurité.

De plus, le bassin d'usagers de la rue pour qui les rues sont conçues est également une considération importante à garder à l'esprit. Le retrait des déplacements traversants dans l'arrondissement de Ville-Marie modifie sensiblement l'évaluation de l'écart entre offre et demande. Les urbanistes et les décideurs devraient se demander quels utilisateurs ils devraient avoir à l'esprit lors de la conception des rues: les personnes qui traversent le quartier en route vers un autre arrondissement, les personnes qui participent à différentes activités dans le quartier, ou les résidents du quartier? Et faut-il donner la priorité aux mêmes groupes d'usagers de la rue dans chaque arrondissement, qu'il soit central ou périphérique? Diverses réponses à ces questions dicteront différentes approches d'allocation de l'espace de rue.

2.2.6.4 *Écart entre l'offre et la demande en transport à l'échelle des corridors*

L'application de l'indice G_1 , qui compare l'offre de voirie à la demande observée, révèle le même déséquilibre en défaveur des cyclistes et des usagers du TC qu'à l'échelle des arrondissements. Le portrait peint par G_1 n'est toutefois pas aussi net en ce qui concerne les conducteurs et les piétons. La plupart des rues semblent être caractérisées par un solde négatif d'espace automobile, tandis que l'espace piéton serait surreprésenté (solde positif) par rapport à la demande. L'indice G_3 modère en partie cette conclusion en considérant qu'une rue devrait offrir une offre minimale pour chaque mode et en ne mesurant que l'adéquation entre l'offre excédentaire et la demande observée. Les indices G_2 et G_4 vont encore plus loin en comparant l'offre de voirie (tout l'espace ou seulement l'espace excédentaire, respectivement) avec la demande potentielle (incluant les déplacements transférables au TC). L'effet de la prise en compte de cette demande potentielle est évident: une fois légèrement sous-représentés, les usagers des transports en commun sont soudainement largement sous-représentés. Les piétons, cependant, se voient toujours offrir plus d'espace que leur part de la demande. Cela peut sans doute s'expliquer par la capacité limitée des enquêtes classiques sur les déplacements à mesurer la demande des piétons.

2.2.6.5 *Potentiel de généralisation de l'indicateur d'écart offre-demande*

Les indicateurs d'écart offre-demande présentés dans cette section peuvent être reproduits dans plusieurs contextes urbains, à condition qu'une quantité minimale de données soit disponible. Du côté de l'offre d'espace, une ville souhaitant appliquer une telle analyse des besoins à son territoire devrait au moins avoir accès à des ensembles de données répertoriant les emplacements des installations de transport pour chaque mode (voies de circulation et de stationnement, voies réservées au transport collectif, voies cyclables et trottoirs). Pour une analyse statique du partage de la rue, c'est-à-dire une analyse qui ne prend pas en compte la variation temporelle de l'allocation de la chaussée, cela pourrait être réalisé avec les données d'OpenStreetMap (OpenStreetMap, 2019), à condition que les données locales soient exhaustives. Afin de saisir la dimension dynamique du partage de la rue, des données détaillées doivent être collectées auprès des autorités municipales, à savoir les heures d'ouverture des voies réservées, la réglementation du stationnement, le statut d'activité des stations de vélos en libre-service et les paramètres saisonniers du réseau cyclable.

Du côté de la demande, la méthode pourrait être appliquée en utilisant soit des données de comptage, soit des données d'enquête de type Origine-Destination. L'utilisation des données de comptages permet une analyse rue par rue, mais limite l'analyse à certains endroits, car les comptages exhaustifs à l'échelle de l'arrondissement ou de la ville sont rares. De plus, les données de comptages ne permettent pas à l'analyste de faire la distinction entre les déplacements internes, externes, attirés et produits puisque le comptage ne fournit pas d'informations sur l'origine et la destination des usagers observés (ni sur les propriétés des passagers). En revanche, les données d'enquêtes permettent une analyse plus approfondie de l'adéquation entre l'offre et la demande dans la rue en fonction de l'origine et de la destination des déplacements. Les données d'enquête offrent également la possibilité de calculer les déplacements actifs potentiels et les parts modales potentielles qui en découlent. Cela est permis par la présence, dans les enquêtes, d'informations sur les ménages, les personnes, les déplacements ainsi que les chaînes de déplacements. Cependant, les enquêtes traditionnelles ne permettent pas une analyse rue par rue, puisque chaque trajet dans la base de données est pondéré par un facteur d'expansion mais ne contient qu'une seule origine et une seule destination. Pour un facteur d'expansion de 25, par exemple, lorsqu'un voyage enregistré dans l'échantillon de l'enquête représente 25 voyages dans la population, un calculateur déterministe de l'itinéraire le plus court comme OSRM produira 25 voyages identiques émanant du même endroit au même moment et utilisant les mêmes rues.

Une analyse approfondie, rue par rue, de l'écart des besoins entre l'offre et la demande des rues nécessiterait donc des données d'enquêtes sur les déplacements désagrégés dans l'espace et dans le temps.

2.2.6.6 *Limites*

Une des principales limites des méthodes présentées est qu'elles dépendent de l'exactitude de plusieurs ensembles de données qui ne partagent pas le même calendrier de mise à jour. La plupart des ensembles de données publiés sur le portail de données ouvertes de la Ville de Montréal sont une agrégation d'ensembles de données collectés par chaque arrondissement. Cela signifie que l'exactitude et la période de référence de certains éléments de la rue, notamment la réglementation du stationnement, peuvent varier selon l'arrondissement.

Cet article considère également tout l'espace partagé avec les conducteurs [CD et PCD] comme un espace automobile exclusif aux fins de l'analyse de l'écart offre-demande. Cela pourrait être nuancé, certains espaces partagés étant considérés comme des espaces piétons ou cyclables s'ils répondent à des critères de faible stress. Il en va de même pour les voies auto où circulent des bus. Les trottoirs, pour leur part, accueillent plusieurs activités qui ne sont pas liées à la fonction de lien de la rue. Ces activités (faire du lèche-vitrines, socialiser, promener le chien ou se promener) sont difficiles à capter dans une enquête de type Origine-Destination. Ces enquêtes visent généralement à capturer les voyages utilitaires et ont tendance à être biaisées en faveur de la collecte de plus de voyages motorisés que de voyages actifs, en particulier les enquêtes menées sur une période qui chevauche le début de l'hiver. Cela souligne la nécessité de réduire ces angles morts du transport actif dans les enquêtes sur les déplacements, mais aussi la possibilité d'utiliser des méthodes alternatives pour déduire le volume de l'activité piétonne relative au rôle de lieu de la rue. Il convient également de noter que les trajets d'accès et de sortie vers et depuis les voitures en stationnement qui ont été estimés dans cet article sont une estimation prudente puisqu'ils supposent que les conducteurs utilisant le stationnement sur rue ont trouvé une place de stationnement sur le même segment de rue que leur destination. Une enquête comprenant des données de suivi GPS pourrait aider à améliorer cette estimation et éventuellement augmenter la demande piétonne observée. De plus, l'Enquête OD n'échantillonne pas les non-résidents, ce qui contribue certainement à la sous-estimation des volumes de piétons dans le centre-ville et les zones touristiques avoisinantes. Ainsi, la notion de solde positif de l'espace piéton à l'échelle doit être interprétée avec prudence et interprétée dans les limites étroites des données actuellement disponibles.

En outre, d'autres profils de demande pourraient rééquilibrer la part du transport actif dans l'analyse d'écart offre-demande. Par exemple, des paramètres de transfert modal plus agressifs pourraient être utilisés pour refléter les cibles municipales de parts modales ou les objectifs de réduction des gaz à effet de serre.

2.2.7 *Perspectives*

Les prochaines étapes du projet visent à analyser les variations du partage de la rue à l'échelle d'une année complète à la lumière de la variabilité de la demande. L'application de différents principes de justice distributive, en plus de l'égalitarisme et du sufficientarisme, est également prévue. De plus, différents indicateurs seront appliqués à l'échelle d'itinéraires spécifiques et de bassins d'accès à divers générateurs de déplacements à l'échelle du territoire d'étude.

2.3 Comprendre les facteurs de dépendance à l'automobile

- Par : Jérôme Laviolette
- Supervision : Pre Catherine Morency / Pr Owen Waygood / Pr Kostas Goulias (UCSB)
- Contexte : Chaire Mobilité / Chaire en transformation du transport

Cette section est constituée d'extraits de la thèse de doctorat en cours de rédaction de Jérôme Laviolette.

Ce projet de recherche doctoral vise à enrichir les connaissances sur les facteurs de dépendance à l'automobile. Le projet comprend deux phases de recherche distinctes, chacune contribuant à enrichir les connaissances sur le sujet. Le schéma général du projet et son état d'avancement au début de l'année 2021 est présenté à la Figure 2-20

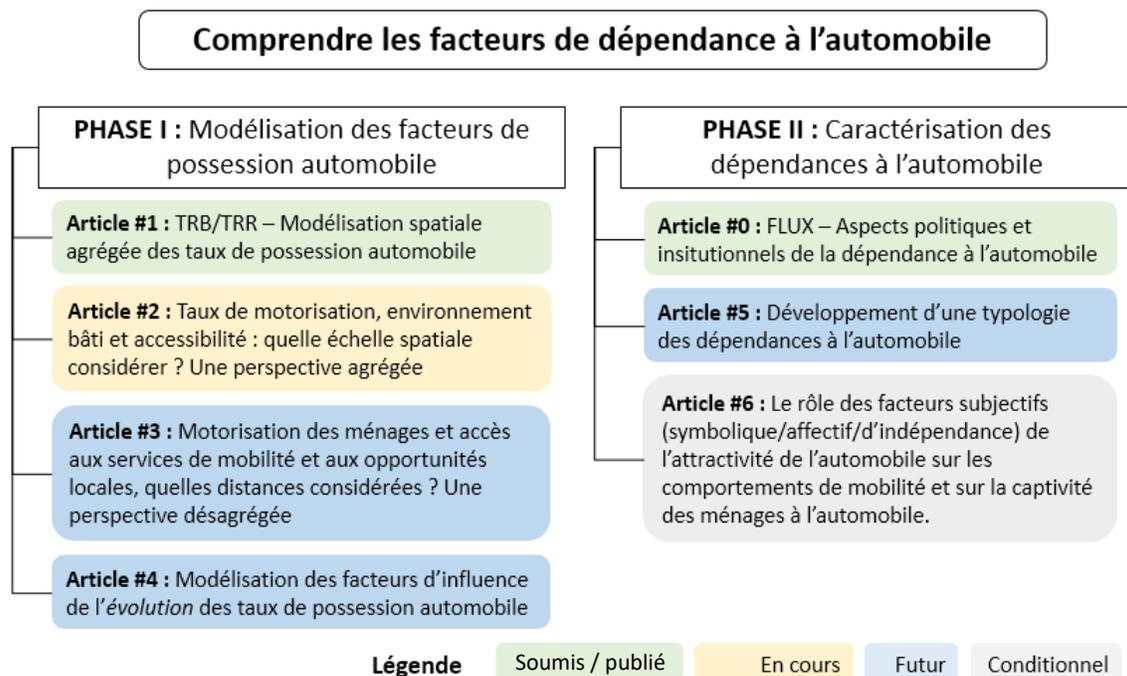
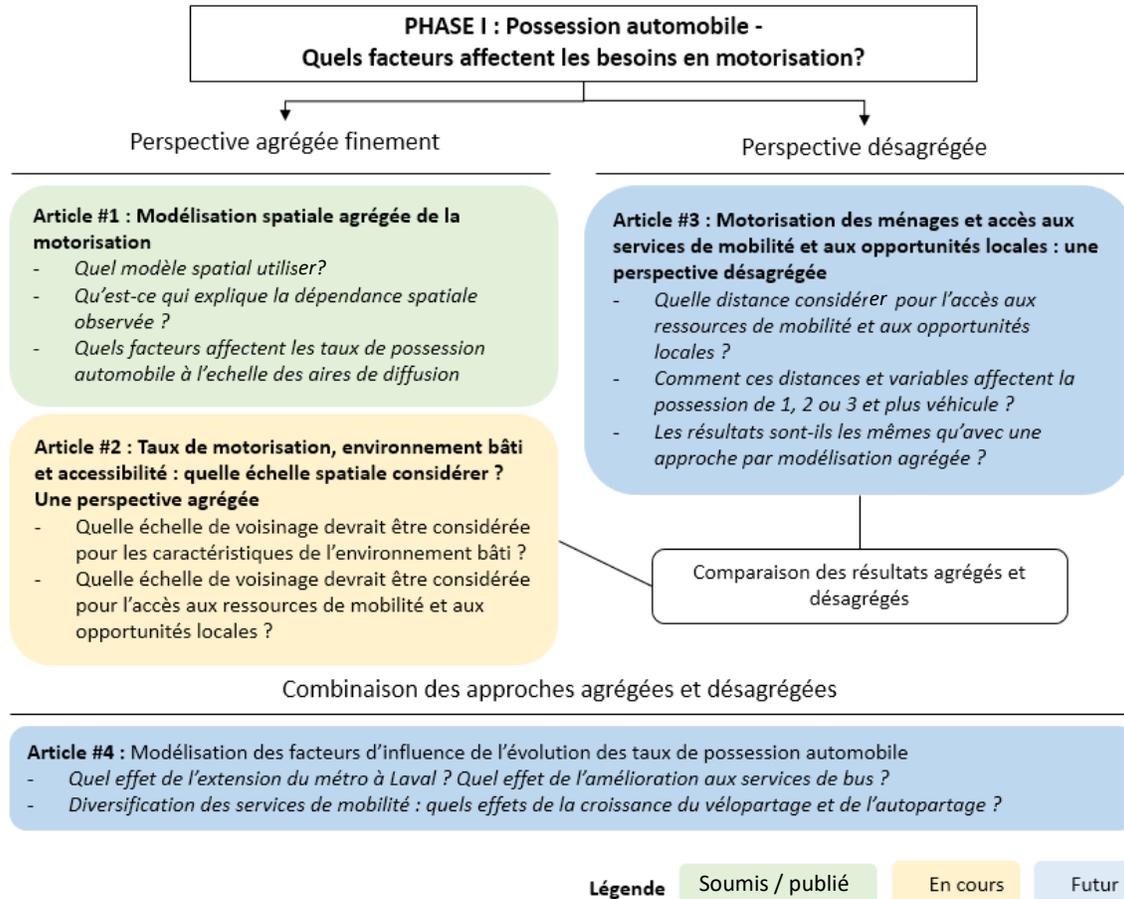


Figure 2-20 : Schéma général des contributions du projet doctoral et avancement au début de l'année 2021.

La première phase vise à modéliser la possession automobile selon différentes méthodes (agrégée et désagrégée) afin de renforcer la compréhension des facteurs qui influencent les décisions de motorisation des ménages. L'objectif est de mieux comprendre le rôle des variables décrivant l'environnement bâti (densité, diversité et design), l'accès aux ressources de mobilité (transport collectif, vélopartage, autopartage) et l'accès aux opportunités de proximité (commerces, écoles, institutions de santé) sur la motorisation tout en contrôlant pour les facteurs sociodémographiques. Une attention particulière est portée à l'échelle de mesure spatiale de ces variables. D'un point de vue méthodologique, le projet a pour objectif de comparer des méthodes de modélisation agrégées qui contrôlent pour la dépendance spatiale et qui utilisent des données d'immatriculation obtenues de la SAAQ avec des modèles désagrégés prenant en entrée les données des enquêtes Origine-Destination. Le schéma détaillé de la première phase est présenté à la Figure 2-21.



Légende

Soumis / publié

En cours

Futur

Figure 2-21 : Schéma détaillé de la Phase I du projet doctoral

La deuxième phase vise à mieux documenter les différents aspects de la dépendance à l'automobile. Un premier article de cette phase publié en juillet 2020 dans un numéro spécial de la revue française FLUX (Lavolette et al., 2020) explore les dimensions politiques et institutionnelles de cette dépendance. Un cadre d'analyse en trois perspective y est proposée afin d'évaluer s'il existe, en contexte québécois, un déclin des mobilités automobiles tel que discuté dans la littérature scientifique internationale en transport au tournant des années 2010 (voir notamment Goodwin, 2012; Goodwin et Van Dender, 2013). Dans la première perspective d'analyse, plusieurs indicateurs de motorisation et d'utilisation de l'automobile sont estimés afin de brosser un portrait des tendances d'automobilité dans les régions de Montréal et de Québec. Comme deuxième perspective d'analyse, les documents officiels de planification et de politiques-cadres de la mobilité sont décortiqués et analysés dans l'objectif d'identifier si un changement de paradigme dans les processus de planification de la mobilité au Québec est en cours et marquerait un déclin d'une planification centrée sur l'automobile. Finalement, la troisième perspective revoit les principaux projets d'infrastructures de transport et de politiques publiques prioritaires afin de d'évaluer s'ils sont alignés avec les objectifs des documents de planification. Prises ensemble, ces trois perspectives tendent à démontrer qu'en dépit de certains signes positifs, le déclin des mobilités automobiles qui s'appuie sur un changement réel de paradigme de mobilité ne semble pas être amorcé au Québec.

Le deuxième volet de cette seconde phase vise à développer un portrait du niveau de captivité des ménages à l'automobile. La méthodologie combinera plusieurs approches développées par la Chaire Mobilité ou en cours de développement pour établir une typologie de captivité des ménages à la possession et à l'utilisation de l'automobile. Les approches suivantes seront combinées : la typologie des ménages de Fabre (2018), une typologie de quartier en cours de développement, des méthodes d'estimations du potentiel de substitution des déplacements automobiles par la marche et le vélo (Morency et al., 2019) et l'utilisation de ratios de compétitivité pour l'estimation du potentiel de substitution des déplacements en transport collectif calculé avec l'outil Transition. La méthode s'appuiera aussi sur une évaluation du rôle des services d'autopartage basé station et en libre-service sur le degré de captivité à la possession automobile.

Finalement, le **dernier volet de cette deuxième phase** est conditionnel à l'avancement du reste des travaux. Si le temps le permet, une enquête sera développée afin de mesurer et d'évaluer le rôle des facteurs subjectifs caractérisant l'attractivité de l'automobile, notamment les facteurs symboliques, affectifs et d'indépendance identifiés par Steg (2005), dans les décisions de mobilité des ménages (localisation résidentielle, possession automobile, comportements de mobilité quotidien) et dans le processus de changement de comportement.

Les prochaines sous-sections présentent les analyses présentées au congrès annuel 2021 du Transportation Research Board (Laviolette et al., 2021) et présentement en révision pour publication dans le *Transportation Research Record*.

2.3.1 Résumé

La possession d'une voiture est liée à une utilisation accrue de l'automobile, ce qui entraîne d'importantes conséquences environnementales, sociales et de santé publique. Bien que la possession automobile continue d'augmenter dans la plupart des pays, il reste pertinent d'examiner quels facteurs et politiques publiques peuvent aider à contenir cette croissance. Les analyses les plus récentes de la possession de voitures ont été menées à l'aide de modèles désagrégés. Cet article utilise un cadre de modélisation économétrique spatiale avancé pour étudier les dépendances spatiales dans la possession d'une voiture par les ménages mesurées à des échelles géographiques fines à l'aide de données administratives sur les véhicules immatriculés et de données de recensement pour l'île de Montréal. Cette résolution fine permet d'utiliser plus de variables explicatives que les modèles agrégés précédents de possession automobile. Des tests formels confirment le choix du modèle d'erreur spatial de Durbin (*Spatial Durbin error model - SDEM*) comme meilleure option de modélisation. La spécification finale du modèle atteint un Pseudo-R² de Nagelkerke de 0,93 et les résultats indiquent que les variables sociodémographiques expliquent une grande partie de la dépendance spatiale observée, mais que les caractéristiques de l'environnement bâti, y compris le niveau de service du transport collectif et l'accessibilité commerciale locale jouent également un rôle non négligeable. Néanmoins, l'ensemble des variables explicatives incluses ne peut pas expliquer toute l'autocorrélation spatiale restante dans les résidus du modèle linéaire et dans le modèle à variables explicatives décalées. Cela indique la présence de facteurs autocorrélés non observés influençant les taux de possession de voitures. La spécification SDEM permet l'interprétation du modèle malgré ces omissions en incorporant un terme d'interaction spatiale dans le terme d'erreur.

2.3.2 Introduction

Les voitures sont omniprésentes dans la plupart des sociétés car elles offrent à leurs utilisateurs une liberté de mouvement sur de grandes distances. Cependant, leur utilisation intensive par une grande partie de la population est désormais largement reconnue comme l'une des principales causes d'émissions de gaz à effet de serre responsables de la crise climatique actuelle (GIEC, 2014). Elle est également liée à des impacts négatifs sur la santé associés aux décès et aux blessures sur les routes, à la pollution de l'air, au stress et plus encore (The World Bank, 2014). La possession d'une voiture en elle-même n'est pas nécessairement perçue comme un problème malgré les nombreuses preuves qu'elle est positivement associée à une utilisation accrue de l'automobile en par conséquent à une utilisation réduite d'autres modes (p. ex. Dieleman et al., 2002; Eluru et al., 2010; Sioui et al., 2013; Sun et al., 2014).

La possession de voitures a augmenté de façon soutenue dans la plupart des pays au cours des dernières décennies, jusqu'à ce qu'une forme de saturation soit atteinte, comme c'est le cas aux États-Unis (Davis et Boundy, 2019). Au Canada, le nombre de voitures a augmenté 1,8 fois plus vite que la population depuis 2000. Cette croissance plus rapide que la croissance de la population est vraie même dans les villes. À titre d'exemple, le nombre de voitures pour 1000 adultes sur l'île de Montréal a augmenté de 10% (de 413 à 455) entre 2000 et 2018 (Laviolette et al., 2020). Cela montre à quel point il reste pertinent de raffiner notre compréhension des facteurs étant déterminants dans la possession automobile.

Les recherches les plus récentes sur le sujet ont été menées à l'aide de modèles désagrégés où l'unité modélisée est le ménage (voir les travaux de Anowar et al. (2014) pour un examen complet). Bien que ces méthodes permettent au chercheur d'acquérir une connaissance approfondie du mécanisme qui façonne les décisions des ménages, elles doivent s'appuyer sur des enquêtes de déplacements dont l'échantillon est parfois de petite taille. Cela pourrait être problématique, par exemple, lorsque l'on tente d'évaluer l'impact de changements localisés dans les infrastructures de transport ou aux niveaux d'accessibilité, car il se peut qu'il n'y ait pas suffisamment d'observations à proximité de ces changements. Alternativement, la modélisation agrégée peut s'appuyer sur des données administratives dans lesquelles presque tous les véhicules immatriculés dans la région étudiée peuvent être comptabilisés. Les taux de possession automobile peuvent ainsi être estimés à différentes échelles géographiques. Lorsque les unités de modélisation sont des zones géographiques, un problème important qui se pose est la dépendance spatiale. Une mesure de la dépendance spatiale est l'autocorrélation spatiale positive qui se produit lorsque des zones proches les unes des autres présentent des valeurs similaires quant à la variable modélisée (Haining, 2001). Cela signifie généralement que les modèles linéaires standards ne peuvent pas être utilisés car cela enfreint les postulats d'indépendance des observations et des termes d'erreur. Des méthodes de modélisation spatiale sont donc nécessaires pour tenir compte de l'interaction spatiale.

L'objectif principal de cette section est de tester l'hypothèse selon laquelle la corrélation spatiale observée dans les taux de possession automobile lorsqu'elle est agrégée à de petites unités géographiques est due à plusieurs facteurs, notamment les caractéristiques sociodémographiques du voisinage, le niveau de service du transport en commun, l'accessibilité commerciale locale et la présence de stations d'autopartage. Pour y parvenir, un cadre de modélisation est proposé pour identifier les spécifications du modèle spatial le mieux adapté pour modéliser les taux de possession automobile à l'aide de données administratives.

2.3.3 Revue de la littérature

Il a été démontré que la motorisation des ménages est liée aux caractéristiques de l'environnement bâti et, dans certains cas, aux politiques de transport (Senbil et al., 2009). On constate que l'âge influence la possession d'une voiture, mais pas de manière linéaire (Sun et al., 2014) et certaines cohortes semblent plus axées sur la voiture que d'autres (Sun et al., 2012). Lorsqu'ils sont modélisés au niveau des ménages, les revenus sont un déterminant clé de la possession d'une voiture avec des revenus plus élevés associés à un plus grand nombre de voitures possédées. Cependant, la relation n'est pas linéaire (Potoglou et Kanaroglou, 2008; Senbil et al., 2009) même lorsque les variables de revenu du quartier sont inclus (Anowar et al., 2016). Il a également été démontré que la taille du ménage influence positivement la possession d'une voiture (Kim et Kim, 2004) et la structure du ménage, comme être un couple ou avoir un enfant (Potoglou et Kanaroglou, 2008; Sun et al., 2014). La présence d'enfants dans le ménage n'est pas nécessairement associée à un plus grand nombre de véhicules lorsque d'autres variables sont prises en compte (Bhat et Pulugurta, 1998).

En termes de variables de l'environnement bâti, une densité résidentielle plus élevée ou une densité mixte plus élevée sont associées à une plus faible propension des ménages à posséder plusieurs voitures (Bhat et Guo, 2007; Potoglou et Kanaroglou, 2008; Sun et al., 2014). Certains ont fait valoir que lorsque les attitudes, les préférences de transport et l'auto-sélection résidentielle sont prises en compte, les variables de l'environnement bâti peuvent ne pas être des facteurs significatifs expliquant la possession d'une voiture (Cao et al., 2007), tandis que d'autres ont montré que même avec un contrôle statistique de ces facteurs, les variables d'environnement bâti demeurent significatives (Bhat et Guo, 2007), ayant même un effet direct sur la décision de posséder une voiture par les ménages (Van Acker et al., 2014).

Les options offertes par le réseau de transport sont liées à l'environnement bâti. L'impact du transport en commun sur la possession d'une voiture a également été fréquemment étudié, mais avec des niveaux de précision variables. Certains n'ont pris en compte que le nombre d'arrêts de transport en commun accessibles à une distance seuil autour du ménage (Potoglou et Kanaroglou, 2008), d'autres ont ajouté le nombre de kilomètres de lignes d'autobus et de lignes de modes sur rail à l'intérieur de cette même zone tampon (Anowar et al., 2016). Des mesures plus précises décrivant le niveau de service de transport en commun ont également été incluses, montrant que des niveaux de service plus élevés sont associés à une moindre possession automobile (Becker et al., 2017). Une variable moins étudiée, mais néanmoins influente sur la possession d'une voiture est la disponibilité du stationnement sur rue et hors rue dans les zones à forte densité. Une disponibilité de stationnement plus élevée des deux types est associée à des niveaux de possession automobile plus élevés (Guo, 2013a, 2013b). Cela suggère que les politiques de gestion du stationnement (telles que des limites basées sur le contexte) devraient être utilisées en tandem avec l'offre de transport en commun pour réduire le besoin de posséder une voiture (De Gruyter et al., 2020).

Comme indiqué ci-dessus, les caractéristiques de l'environnement bâti du voisinage peuvent influencer la possession automobile, mais des méthodes de modélisation spatiale agrégée ont rarement été utilisées pour examiner la possession d'une voiture. Par exemple, Clark et Finley (2009) ont comparé trois méthodes de modélisation spatiale (Modèle d'erreur spatial (SEM), Régression géographiquement pondérée (GWR) et le Modèle spatial bayésien hiérarchique) pour examiner la relation entre le taux de possession automobile des ménages et le revenu en Angleterre et au Pays de Galles en utilisant les données du recensement. L'unité de modélisation était constituée de circonscriptions électorales agrégées, ce qui donnait un total de 1 100 unités

à travers le pays et les variables explicatives étaient simplement la densité de population et le revenu net des ménages. Dans un autre article, le même auteur a comparé le SEM avec le GWR en utilisant les deux mêmes variables, mais à une échelle géographique plus fine, où un total de 8 000 circonscriptions électorales à travers le pays ont été utilisées (Clark, 2007). Dans une étude exploratoire pour Transport for London, Whelan et al. (2010) ont testé une gamme de formulations de modèles (fonctions linéaires, log-linéaires ou en forme de S telles que la logistique ou Gompertz et le GWR) pour modéliser le nombre de véhicules par adulte dans la zone de super sortie de la couche inférieure (Lower Layer Super Output Area : LSOA), une unité statistique britannique avec une population moyenne de 1 500 habitants. De nombreuses variables sociodémographiques ont été incluses (revenu, structure du ménage, mode d'occupation du logement, nationalité) ainsi que trois variables pertinentes pour les politiques de transport: le niveau d'accessibilité aux services de transports publics, le coût et la couverture des permis de stationnement sur rue et une mesure de l'accessibilité locale aux commodités. Ils ont conclu que les trois variables avaient l'ampleur et le signe attendu (impact négatif sur les taux de possession de voitures). À l'exception de la formulation GWR, les autres modèles testés par Whelan et collègues ne tenaient pas compte de l'autocorrélation spatiale. Les effets d'interaction spatiale dus à des facteurs observés et non observés ont également été intégrés dans des modèles de choix discrets de composition de la flotte de ménages par Paleti et al. (2013). Leurs résultats montrent qu'un effet d'interaction spatiale basé sur la distance entre les ménages est statistiquement significatif, améliore l'ajustement du modèle et conduit à des estimations d'élasticité considérablement plus élevées que le modèle non spatial. Cette différence d'ampleur pourrait conduire à des prévisions très différentes des effets des politiques publiques, indiquant clairement la nécessité d'intégrer la dépendance spatiale lors de la modélisation de la possession automobile.

L'examen suggère que les méthodes avancées de modélisation spatiale de pointe, telles que le modèle Spatial Durbin (SDM) ou le modèle d'erreur spatial Durbin (SDEM) comme suggéré par LeSage (2014), n'ont pas été utilisées pour modéliser les taux de possession automobile. En outre, les modèles agrégés de possession automobile utilisent généralement de grandes unités géographiques telles que les circonscriptions électorales ou les zones d'analyse transport. La plus petite unité déclarée utilisée était la zone de super sortie de la couche inférieure (LSOA) du recensement au Royaume-Uni (Whelan et al., 2010) et aux États-Unis, la zone d'analyse transport (Holtzclaw et al., 2002). La présente analyse utilise les données administratives fournies par la Société d'assurance automobile du Québec (SAAQ) pour modéliser la possession automobile à une échelle géographique très fine à l'aide de méthodes de modélisation spatiale de pointe. Cela permet d'utiliser plusieurs variables sociodémographiques et de l'environnement bâti pour expliquer la variation locale des niveaux de possession automobile par les ménages dans le but d'examiner la dépendance spatiale.

Comme indiqué ci-dessus, diverses influences ont été constatées sur les niveaux de possession véhiculaire, mais les variables prises en compte dans les études agrégées spatialement ont été limitées. Dans cette étude, le niveau spatial plus fin permettra de prendre en compte les influences de l'environnement bâti à des niveaux qui reflètent mieux les courtes distances de marche qui sont essentielles pour une vie sans voiture (ou avec moins de voiture).

2.3.4 Méthodologie

2.3.4.1 *Considérations théoriques pour la modélisation spatiale de la possession automobile*

Deux raisons principales sont attribuées à la présence d'une dépendance spatiale lorsque deux observations proches l'une de l'autre ont des valeurs similaires (autocorrélation spatiale positive)

(Haining, 2001). Le premier est la continuité spatiale, où les unités de modélisation ne reflètent pas nécessairement la nature du phénomène observé. Dans le cas présent, l'unité de modélisation est l'aire de diffusion (AD) du recensement canadien. Les limites définies par Statistique Canada pour ces zones ne sont pas spécifiquement conçues pour modéliser les taux de possession de voitures. Cela signifie que la taille de l'unité de modélisation peut être inférieure à l'échelle à laquelle la possession d'une voiture varie dans l'espace. La deuxième raison est que l'autocorrélation spatiale du processus étudié dépend de la relation spatiale entre les facteurs d'influence observés et non observés. Dans le cas de la possession d'une voiture, il a été démontré que de nombreux facteurs décrivant la forme urbaine, y compris la mixité de l'environnement bâti, la densité de la population, la densité d'emplois et les caractéristiques de la route et des réseaux de transport en commun peuvent influencer le besoin de posséder une voiture. En outre, les caractéristiques sociodémographiques des ménages (revenu, composition du ménage et âge) pourraient également présenter une distribution spatiale spécifique où les individus s'auto-sélectionnent dans des quartiers qui correspondent à leur mode de vie. On s'attend donc à ce que, lorsqu'ils sont agrégés à une unité spatiale telle que l'aire de diffusion, les niveaux de possession automobile observés aient une composante spatiale importante qui reflète l'emplacement de cette unité dans la région étudiée.

Cela signifie que lors de la modélisation des niveaux de possession automobile avec une régression linéaire ordinaire des moindres carrés, le postulat d'indépendance des observations n'est pas respecté. Cela conduirait à des coefficients de régression biaisés et incohérents. De plus, le postulat d'indépendance des termes d'erreur pourrait également être violé, ce qui signifie que les résidus de la régression seraient corrélés dans l'espace. Cette seconde violation indique que d'autres variables explicatives sont possiblement manquantes (LeSage, 2008).

Compte tenu de ces éléments, Elhorst (2010) explique qu'il existe trois types d'interaction spatiale qui pourraient expliquer la corrélation d'une région avec ses voisins spatiaux. Le **premier est un effet d'interaction** spatiale endogène, plus communément appelé décalage sur la variable dépendante, où les agents (dans le cas présent, la population adulte ou les ménages) d'une région sont influencés par les décisions des régions voisines. Dans le cas de la possession automobile, cela pourrait représenter des facteurs de normes sociales sous-jacentes (par exemple, des normes descriptives (Lapinski et Rimal, 2005)) en jeu où les décisions des gens en matière de possession d'une voiture sont influencées par ce qu'ils voient dans les rues avoisinantes. Ces processus seraient modélisés au moyen d'un modèle autorégressif simultané (SAR) dans lequel un vecteur de décalage spatial est ajouté au modèle linéaire standard qui reflète la valeur moyenne du niveau de possession automobile des régions voisines pour expliquer le niveau de possession automobile d'une région. L'équation des modèles SAR prend la forme suivante:

$$y = \rho W y + X \beta + \varepsilon \quad (1)$$

Où pour n unités spatiales, W est une matrice n x n où les éléments non nuls représentent des unités spatiales qui sont connectées les unes aux autres et le paramètre ρ représente la force de la dépendance spatiale.

Le **deuxième effet d'interaction** est exogène, c'est-à-dire que les décisions dans chaque région sont influencées par un ensemble de variables explicatives indépendantes à l'intérieur de leurs propres limites, mais aussi leurs valeurs moyennes dans les régions voisines. Dans le cas des décisions relatives à la motorisation, notre hypothèse est que cela est très probablement dû à la configuration des caractéristiques de l'environnement bâti telles que les mesures de diversité d'utilisation du sol, la conception du réseau routier et la densité de la population qui varient à une

échelle plus grande que la taille des zones (ici, les aires de diffusion). Ce processus est modélisé par un modèle SLX qui ajoute, au modèle linéaire standard, le terme $WX\gamma$ où γ est le vecteur du coefficient $k * 1$ des variables X décalées:

$$Y = X\beta + WX\gamma + \varepsilon \quad (2)$$

Le **troisième effet** est la présence de variables latentes similaires entraînant des comportements similaires. Cet effet permet de gérer l'enjeu de variables explicatives omises décrit ci-dessus. La façon la plus courante de modéliser cet effet consiste à ajouter un coefficient autorégressif spatial dans le terme d'erreur pour refléter la dépendance dans les résidus de régression. Un modèle avec seulement cet effet est appelé le modèle d'erreur spatiale (SEM) et est défini par l'équation suivante:

$$\begin{aligned} y &= X_i\beta + u \\ u &= \lambda W + \varepsilon \end{aligned} \quad (3)$$

Où λ désigne la force de la dépendance spatiale dans le terme d'erreur. Bien que ces trois modèles spatiaux incluent chacun un type d'interaction spatiale, l'approche moderne de modélisation spatiale suggère de tester des modèles plus complexes impliquant deux termes d'interaction spatiale (Elhorst, 2010). Ces modèles sont : le modèle SACSAR (également appelé modèle de Kelejian-Prucha) qui a une variable dépendante spatialement décalée (WY) et un terme d'erreur spatialement autocorrélé ($W\varepsilon$), le modèle spatial de Durbin (SDM), préconisé par LeSage et Pace (2009), qui comprend une variable dépendante décalée (WY) et des variables explicatives spatialement décalées (WX) puis le modèle d'erreur spatial de Durbin (SDEM), qui est un modèle avec un terme d'erreur spatialement autocorrélé (λW) et des variables indépendantes spatialement décalées (WX). Il prend la forme suivante:

$$\begin{aligned} Y &= X\beta + WX\gamma + u \\ u &= \lambda W + \varepsilon \end{aligned} \quad (4)$$

Considérations locales versus globales

Elhorst (2010), se référant au livre de LeSage et Pace (2009), indique que le SDM offrira des estimations de coefficients non biaisées même si le véritable processus de génération de données est l'un des autres modèles (modèles SAR, SEM, SDEM ou SACSAR). Malgré cela, peu d'explications sont données sur la façon de tester lequel des modèles SDEM ou SDM serait le mieux adapté pour modéliser le phénomène étudié car ces deux modèles ne sont pas imbriqués. Dans un article plus récent, LeSage (2014) soutient fermement que l'utilisation du modèle SACSAR présente trop d'inconvénients pour un travail appliqué. Il suggère également que les considérations relatives au choix du modèle Spatial de Durbin ou du modèle d'erreur spatial de Durbin devraient être fondées sur une solide base théorique quant à savoir si le phénomène étudié a des retombées locales ou régionales. Des tests plus formels pour comparer différents modèles existent et sont examinés plus loin dans cet article.

Dans le cas présent, l'effet de débordement régional impliquerait qu'un changement de l'une des variables indépendantes ou au taux de possession automobile n'importe où dans la région étudiée aurait un impact sur toutes les zones de la région. Cette question dépend des variables spécifiques incluses dans le modèle. Il est peu probable que les changements des variables sociodémographiques aient des retombées régionales. À titre d'exemple, l'hypothèse est que

l'embourgeoisement d'un quartier entraînerait un changement démographique qui pourrait augmenter les taux de possession automobile dans les aires de diffusion de ce quartier, ayant un effet de débordement local, mais il est peu probable qu'il se répercute sur toute la ville. D'un autre côté, certaines variables de l'environnement bâti pourraient avoir une gamme d'influence beaucoup plus large. L'ouverture d'une nouvelle ligne de métro avec plusieurs stations pourrait avoir un impact sur les décisions en matière de possession automobile non seulement pour un ménage vivant dans les aires de diffusion voisines de ces nouvelles stations, mais aussi pour les personnes habitant beaucoup plus loin qui auraient désormais accès à ces nouvelles stations en voiture ou via le réseau d'autobus.

Une autre considération est la facilité d'interprétation d'un modèle local par rapport à un modèle global. Dans un modèle local tel que le SDEM, l'effet direct est l'influence moyenne des variables indépendantes de la zone i sur la variable dépendante de la zone i . L'effet indirect est l'influence moyenne des variables indépendantes des zones voisines j (lorsque les régions voisines sont définies par la matrice W normalisée en ligne) sur la variable dépendante de la zone i .

2.3.4.2 *Cadre de modélisation*

Pour examiner l'hypothèse selon laquelle l'environnement bâti, le niveau de service de transport en commun et la disponibilité de l'autopartage expliquent en partie la dépendance spatiale du taux de possession automobile, un cadre de modélisation spatiale est proposé. Le cadre s'inspire largement de la littérature récente d'économétrie spatiale et suit de près la procédure décrite par Elhorst (2010). Le cadre d'Elhorst est un mélange de la stratégie moderne de recherche de spécification de modèle du plus général au plus spécifique recommandée par LeSage et Pace (2009) et de la stratégie plus classique de spécifique à général énoncée par Anselin (1988).

Après une analyse appropriée de la distribution spatiale des taux de possession automobile par les ménages et l'évaluation de l'autocorrélation spatiale à l'aide de l'indice de Moran global, un modèle de régression linéaire (OLS) avec divers ensembles de variables explicatives sociodémographiques potentielles a été exécuté. Les résidus ont été inspectés visuellement sur la carte et officiellement testés pour l'autocorrélation spatiale à nouveau en utilisant l'indice de Moran global I . Les tests du multiplicateur de Lagrange d'Anselin (1988) ont été utilisés pour vérifier si le modèle OLS devait être rejeté en faveur du modèle de décalage spatial (SAR) ou du modèle d'erreur spatiale (SEM). Comme les deux tests étaient significatifs, le SDEM a été exécuté. Des tests de rapport de vraisemblance - *likelihood ratio test* - ont ensuite été effectués pour voir si ce modèle plus complexe pouvait être réduit au SLX ou au SEM. La spécification choisie a ensuite été testée avec différentes structures de voisinage. La matrice de contiguïté de Queen, les K plus proches voisins (où $K = 10$ à 40 , par pas de 5 sont testés) ainsi qu'une matrice de voisinage en dessous de distances seuils de 800 , 1000 , 1200 , 1400 et 1600 m ont été testés. Alors que les matrices de poids avec fonction de décroissance de distance auraient également pu être testées, ces matrices brouillent la frontière entre les spécifications locales et globales (LeSage, 2014). Le critère d'information d'Aikake (AIC) a été utilisée pour évaluer quelle matrice W offre un bon ajustement du modèle, sans essayer d'affiner la meilleure matrice possible, car des matrices similaires seront fortement corrélées en raison d'éléments communs (LeSage et Pace, 2014). À cette étape, la spécification optimale du modèle a été confirmée. Les variables possibles pour décrire l'environnement bâti (Tableau 2-4) ont été ajoutées toutes en même temps. La procédure de test pour la spécification du modèle a été exécutée à nouveau pour voir si l'ajout des variables d'environnement bâti apportait une modification à la spécification du modèle. Ensuite, chaque variable a été supprimée une par une pour tester si leur présence offrait une amélioration significative de l'ajustement du modèle. L'ajustement du modèle a été évalué à l'aide des valeurs

AIC et du test du rapport de vraisemblance. Cette étape a été répétée jusqu'à ce qu'aucune variable ne puisse être supprimée sans diminuer significativement l'ajustement du modèle.

L'analyse de la dépendance spatiale et les schémas de pondération ont été réalisés à l'aide du package *spdep* dans R et les modèles spatiaux ont été estimés à l'aide du package *spatialreg* (Bivand, 2019, 2020).

2.3.4.3 Région d'étude

La région pour la présente analyse est l'île de Montréal. L'île de Montréal comprend la ville de Montréal ainsi que 15 autres municipalités. Selon le recensement canadien de 2016, l'île a une population de 1 942 000 habitants avec une densité moyenne de population de 3889 pers./km² (Statistic Canada, 2017). En 2016, le système de transport en commun comportait trois composantes, un système de métro de quatre lignes et 68 stations (64 situées sur l'île), un système de bus de 218 lignes et six lignes de train de banlieue convergeant vers le centre-ville. L'unité de modélisation pour l'analyse est l'aire de diffusion (AD). Il s'agit de la plus petite unité géographique standard pour laquelle toutes les variables du recensement sont disponibles. Cette unité spatiale couvre tout le Canada et compte en moyenne une population de 400 à 700 personnes selon le recensement précédent. Les limites de l'AD sont celles du recensement de 2016. Il y a un total de 3202 AD sur l'île de Montréal; 3156 observations complètes (sans valeur manquante en 2016) sont prises en compte pour l'analyse. Les AD non habitées sont principalement des parcs et des zones industrielles qui ne sont pas pertinentes pour l'analyse de la possession automobile résidentielle.

2.3.4.4 Sources de données

Données d'immatriculation. Le nombre de véhicules résidentiels immatriculés pour 2016 regroupés au niveau de l'aire de diffusion (AD) a été obtenu auprès de la Société d'assurance automobile du Québec (SAAQ).

Variables du recensement. Un ensemble de variables sociodémographiques a été obtenu à partir du recensement canadien de 2016 au niveau de l'AD à l'aide du centre de données CHASS de l'Université de Toronto.

Variables de l'environnement bâti et d'accessibilité. L'ensemble de données sur l'utilisation des sols a été téléchargées sur le site de la Communauté Métropolitaine de Montréal (CMM) pour l'année 2016. Les GTFS pour 2016 ont été extraits de Transitfeeds.com. L'ensemble de données sur les stations d'autopartage a été obtenu de Communauto, la seule entreprise d'autopartage en station opérant à Montréal. Les opportunités commerciales ont été extraites de l'ensemble de données Enhanced Point of Interest (EPOI) de l'entreprise DMTI Spatial. La procédure d'extraction spécifique peut être fournie à la demande par les auteurs. Le réseau routier et piétonnier d'OpenStreetMap a été utilisé pour le calcul des zones tampons d'accessibilité à pied.

Tous les jeux de données ont été intégrés dans une base de données géospatiale dans PostgreSQL, en utilisant l'extension spatiale PostGIS.

2.3.4.5 Préparation des variables

Variable dépendante: Le nombre de véhicules par ménage a été utilisé comme variable dépendante. Il a été obtenu en divisant le nombre total de voitures résidentielles (de promenade) et de camions légers immatriculés dans une AD par le nombre de logements privés occupés par les résidents habituels. Cette variable a été choisie plutôt que le nombre de véhicules par adulte car l'acquisition de véhicules est principalement une décision au niveau des ménages liée au revenu disponible de ceux-ci. Une limitation importante de ces données est que les propriétaires

de petites entreprises ou les travailleurs autonomes qui utilisent leur voiture de travail également pour leur usage personnel ne sont pas comptabilisés puisque ces véhicules sont enregistrés comme commerciaux. Cela ne poserait pas de problème si la proportion de ces véhicules était répartie de manière homogène sur le territoire, mais il est peu probable que ce soit le cas. Une hypothèse est que les ménages à revenu élevé sont plus susceptibles de faire immatriculer leurs véhicules de cette façon.

La Figure 2-22 montre une carte de la répartition du nombre de véhicules / ménage dans la région étudiée.

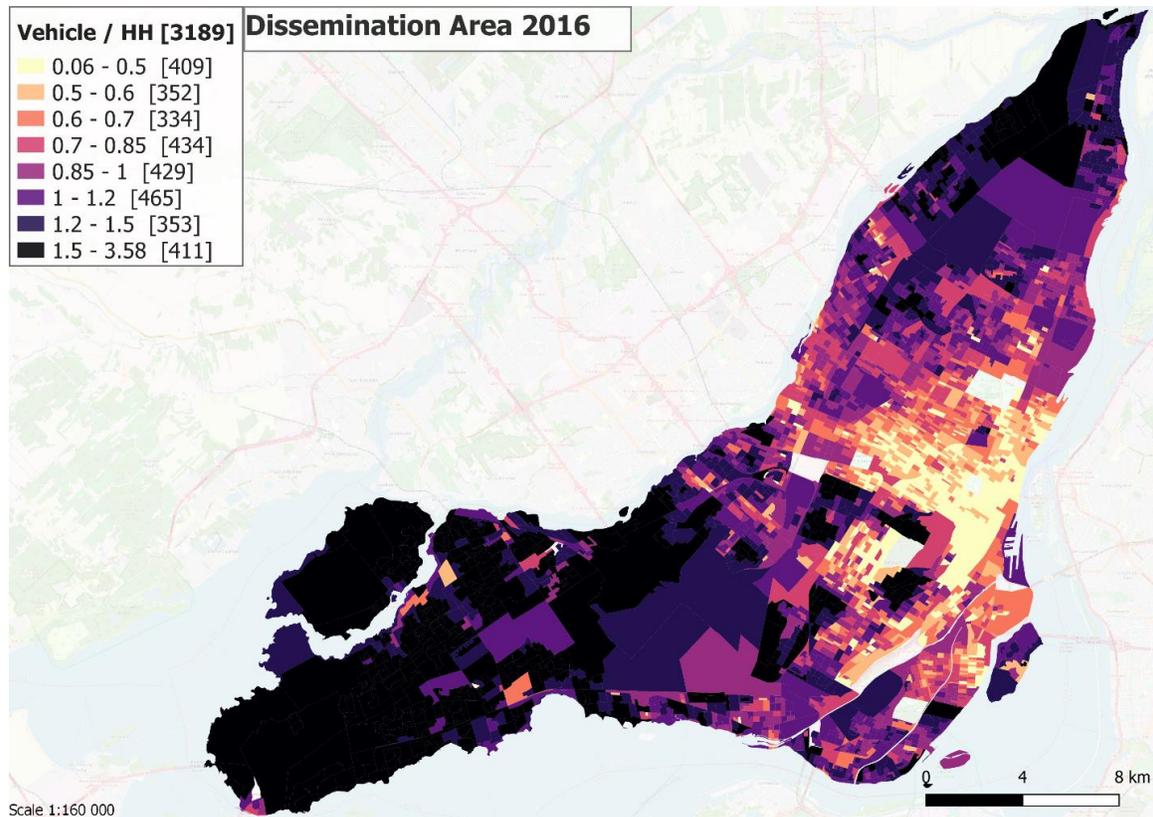


Figure 2-22 : Distribution du nombre de véhicules / ménage sur l'île de Montréal à l'échelle des AD de 2016. Dans la légende, les valeurs entre [] indiquent le nombre de AD.

Variables explicatives: Toutes les variables sociodémographiques et de l'environnement bâti potentielles (sélectionnées sur la base de recherches antérieures) sont énumérées dans le Tableau 2-4. L'indice d'entropie utilisé pour estimer le mixte d'utilisation des sols au sein de chaque AD est estimée selon la méthode décrite par Cervero et Kockelman (1997) en considérant cinq catégories d'utilisation: résidentiel, commercial, espaces de bureaux, loisirs et parcs et institutionnel.

Pour une précision maximale, l'accessibilité aux transports en commun et aux opportunités commerciales a été mesurée comme des opportunités cumulatives dans une zone tampon accessible à pied sous une distance seuil. À l'aide de l'outil d'analyse de réseau de QGIS avec le réseau OSM accessible à pied (incluant ainsi les sentiers de parcs et d'autres « raccourcis » pour piétons), des polygones couvrant l'espace délimité par une distance réseau de 400 m et 800 m autour du centre de gravité de chaque AD ont été calculés. Ces distances correspondent respectivement à environ 5 et 10 minutes de marche à un rythme normal. Après plusieurs tests

de sensibilité, le seuil de 400 m a été retenu pour le nombre d'arrêts de bus et pour le nombre de passages-lignes accessibles à ces arrêts sur une période de 24 heures. Le tampon de 800 m a été utilisé pour la présence d'une station de métro (variable binaire), le nombre d'épiceries, le nombre de véhicules d'autopartage et la présence d'au moins une station d'autopartage (toujours à la suite de tests de sensibilité pour les différents seuils).

Tableau 2-4 : Statistiques descriptives de la variable dépendante et des variables explicatives potentielles

Région: Île de Montréal n = 3156 Aires de diffusion (AD)	Écart-			Asymétrie	Kurtosis
	Moy.	type	Min Max		
AD Superficie [km ²]	0.15	0.58	0.01 16.00	15.07	289.94
Variable dépendante					
Véhicules / ménage	0.942	0.425	0.11 2.788	0.706	-0.025
Variables sociodémographiques					
REVENU					
% de mén. avec rev. total <= 50k \$	0.456	0.176	0 0.935	-0.32	-0.369
Revenu médian des mén. après impôts	52966	24419	11440 283904	3	16
Log (Rev. méd. des mén. après impôts)	10.802	0.368	9.345 12.556	0.749	1.726
MÉNAGE					
Taille moyenne	2.284	0.471	1.241 4.367	0.492	-0.222
% des ménages à 1 personne	0.359	0.147	0 0.812	-0.034	-0.488
% des ménages avec enfants	0.374	0.148	0 0.800	0.062	-0.689
ÂGE					
Âge moyen	40.34	5.44	23.40 79.80	1.84	7.40
% de la pop. âgée de 20 à 34 ans	0.230	0.097	0.000 0.684	1.261	1.846
% de la pop. âgée de 65 ans et plus	0.161	0.093	0.016 0.944	2.554	11.188
HABITATION					
% de maisons détachées	0.154	0.287	0 1	2.004	2.695
% de propriétaires	0.429	0.284	0 1	0.657	-0.624
Variables d'environnement bâti					
Densité d'habitation [Mén. / km ²]	4888	4396	14 81004	4.53	50.50
Log (densité d'habitation)	8.13	0.95	2.66 11.30	-0.95	2.08
Entropie - 5 catégories	0.26	0.22	0.00 0.97	0.56	-0.61
Variables d'accessibilité aux ressources de mobilité et aux opportunités locales					
Nb. d'arrêts de bus, DM 400 m	7.24	4.71	0 29	0.67	0.45
Passages-lignes de bus /24h, DM 400 m	295	215	0 1893	1.20	2.61
Station de métro, DM 800 m (1/0)	0.226	0.419	0 1	1.31	-0.29
Station Communauto, DM 800 m (1/0)	0.56	0.50	0 1	-0.24	-1.94
Nb. de voitures Communauto, DM 800 m	5.74	9.60	0 65	2.52	7.21
Nb. d'épiceries, DM 800 m	5.08	5.81	0.00 37.00	1.99	4.95

Notes: DM = Tampon de distance de marche

Bien que la superficie des aires de diffusion ne soit pas une variable potentielle, sa présence dans le tableau montre une distribution fortement asymétrique en raison d'un petit nombre de très grandes aires de diffusion. En fait, 97,8% des AD sont inférieures à la moyenne plus un écart-type et les valeurs Q1, Médiane et Q3 sont respectivement de 0,038, 0,063 et 0,124 km². La transformation logarithmique de deux distributions fortement asymétriques (revenu médian des ménages après impôt et densité d'habitation) est présentée parce que les variables transformées sont utilisées dans les modèles. La taille de l'échantillon étant importante (> 300), les tests de normalité formels ne sont pas recommandés (Kim, 2013). Une inspection visuelle accompagnée de valeurs absolues d'asymétrie (≤ 2) et de Kurtosis (≤ 7) indiquent que la plupart des variables non binaires suivent une distribution normale symétrique à l'exception du nombre de stations d'autopartage et du pourcentage de la population âgée de 65 ans ou plus.

2.3.5 Résultats

L'indice I de Moran pour la variable dépendante montre une autocorrélation significative avec une valeur de 0,702 lorsque calculé avec une matrice normalisée par ligne des 30 voisins les plus proches. Une valeur de 0 indique aucune autocorrélation spatiale tandis qu'une valeur de 1 indique une autocorrélation spatiale positive parfaite et une valeur de -1 une autocorrélation spatiale négative parfaite, c'est-à-dire des valeurs élevées entourées de valeurs faibles et des valeurs faibles entourées de valeurs élevées comme sur jeux d'échec. Lorsque la matrice contiguë de voisinage Queen est testée, la valeur de Moran est de 0,779 alors que lorsque la matrice des 10 voisins les plus proches est utilisée, la valeur est de 0,755. Lorsque 40 voisins sont considérés, la valeur tombe à 0,685. Cela indique que les voisins plus proches présentent une corrélation plus élevée, mais la valeur reste élevée à mesure que le nombre de voisins augmente. La représentation visuelle des indices I de Moran est illustrée par un nuage de points de Moran affiché à la Figure 2-20 . L'axe Y représente la valeur spatialement décalée de la variable dépendante, c'est-à-dire la valeur moyenne en véhicules / ménage des 30 voisins les plus proches. L'axe des abscisses montre la variable dépendante et la pente de la régression représente la valeur de l'indice I de Moran.

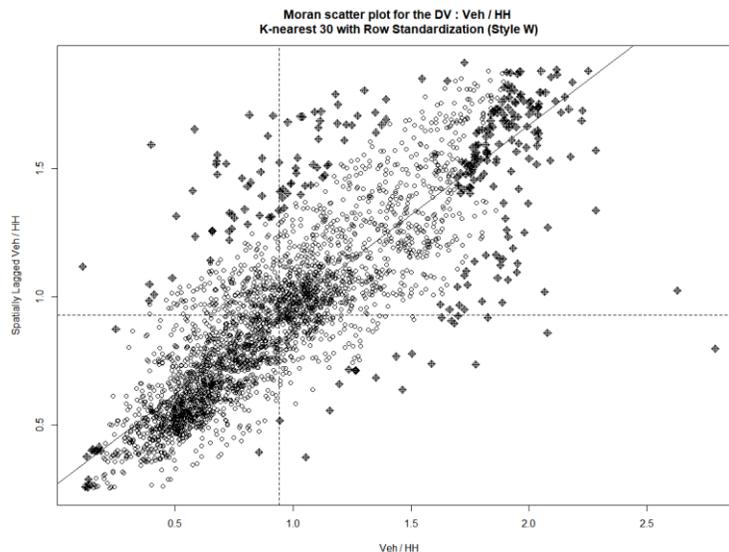


Figure 2-23 : Diagramme de Moran pour la variable dépendante (véhicules / ménage) avec une matrice de voisinage des 30 plus proches voisins. Les points en étoiles indiquent des observations avec une influence importante sur l'indice I de Moran

2.3.6 Résultats

Modèles OLS avec variables sociodémographiques seulement

Suivant l'étape préliminaire ci-dessus qui a confirmé une corrélation spatiale importante du taux de possession automobile, plusieurs régressions linéaires standards ont été estimées avec différentes combinaisons de variables, une pour chaque sous-catégorie sociodémographique (Tableau 2-4). Deux ensembles ont été retenus pour une analyse plus approfondie. L'ensemble A contenait quatre variables : le % de ménages ayant un revenu total de moins de 50 000 \$ CAN, le % de maisons détachées, le % de ménages avec enfant et l'âge moyen. L'ensemble B contenait cinq variables: le logarithme du revenu médian après impôt des ménages, le % de propriétaires, le % de ménages avec enfants, le % de la population âgée de 20 à 34 ans et le % de la population âgée de 65 ans ou plus. Pour les modèles linéaires standards (OLS), l'ensemble A avec quatre variables semble expliquer plus de variance, montrant un meilleur ajustement du modèle ($R^2 = 0,8664$) que l'ensemble B avec cinq variables ($R^2 = 0,8411$) et a une autocorrélation résiduelle plus faible (ensemble A: Indice I de Moran des résidus = 0,283, Ensemble B: Indice I de Moran des résidus = 0,36), expliquant ainsi plus de dépendance spatiale. Pour les deux modèles cependant, le test de Breush-Pagan de Student était très significatif indiquant une hétéroscédasticité importante.

Résultats des modèles spatiaux

Les résultats des tests des multiplicateurs de Lagrange, à la fois les versions régulières et robustes, ont été réalisés sur les deux modèles OLS avec les ensembles A et B décrits ci-dessus. Dans les deux cas, des tests réguliers et robustes pour l'erreur spatiale et les décalages spatiaux étaient tous significatifs à une valeur $p < 0,0001$ indiquant clairement que l'utilisation de modèles de régression linéaire standard doit être rejetée car les postulats d'indépendance des observations et des termes d'erreur n'est pas respecté.

À la suite de la procédure, un modèle d'erreur spatial de Durbin (SDEM) avec des variables exogènes décalées et un décalage sur le terme d'erreur a été estimé pour les deux ensembles de variables explicatives sociodémographiques. Les tests de rapport de vraisemblance (*Likelihood ratio tests*) avec des modèles plus simples (SEM et SLX) ont indiqué que les deux modèles ne devraient pas être réduits à un modèle avec un seul terme d'interaction spatiale.

De plus, contrairement au modèle de régression linéaire standard, les résultats de la spécification SDEM indiquent que l'ensemble B avec cinq variables (M2b: $\lambda = 0,874$, LL = 2293, AIC = -4560 et le pseudo R^2 de Nagelkerke de 0,924) présente un meilleur ajustement aux données que l'ensemble A avec quatre variables (M2a: $\lambda = 0,831$, LL = 2232, AIC = -4441 et pseudo R^2 de Nagelkerke de 0,921). Ce résultat est valable même en supprimant l'une ou l'autre des variables de groupe d'âge de l'ensemble B. L'ensemble B a donc été utilisé pour les étapes suivantes car il offre un meilleur ajustement aux données lorsque les interactions spatiales sont incorporées dans le terme d'erreur.

Validation de la matrice de voisinage W

Le modèle SDEM a ensuite été testé avec différentes formulations de la matrice de poids comme décrit dans la méthodologie. Cette comparaison indique que les matrices des voisinages avec $K = 40$ offrent le meilleur ajustement du modèle. Mais les différences avec $K = 25, 30$ et 35 n'étaient pas significatives. La matrice initiale des 30 plus proches voisins a ainsi été préservée. Cette étape sera répétée lors de la formulation finale du modèle.

Ajout de variables explicatives d'environnement construit et d'accessibilité

Dans une première formulation (M3b.1), les variables suivantes ont été ajoutées en un seul bloc à l'ensemble B de variables sociodémographiques: la transformée logarithmique de la densité des ménages, l'entropie à cinq catégories, le nombre d'arrêts de bus à moins de 400 m, la présence d'une station de métro à moins de 800 m, le nombre d'épiceries (grandes chaînes et magasins d'alimentation indépendants) à moins de 800 m et le nombre de véhicules d'autopartage à moins de 800 m.

Puisque ces variables d'accessibilité ont été mesurées en additionnant les opportunités dans une zone tampon de distance de marche (400 ou 800 m) autour du centre de gravité de chaque zone, cela n'a pas beaucoup de sens d'avoir une valeur spatialement décalée de ces variables (valeur moyenne des zones avoisinantes) car les zones tampons capturent déjà l'influence du voisinage. Par conséquent, dans le modèle SDEM avec toutes les variables, les valeurs décalées de ces quatre variables (bus, métro, épiceries, autopartage) n'ont pas été prises en compte.

Dans la première formulation, la seule variable non significative était le nombre de véhicules d'autopartage accessibles en 800 m à pied. Le modèle a été exécuté à nouveau (M3b.2), en remplaçant la variable par une variable binaire représentant la présence d'au moins une station d'autopartage également à moins de 800 m de marche. Ce changement permet une amélioration marginale de l'ajustement du modèle selon l'AIC (M3b.1: -4788.5 vs M3b.2: -4793.8) et la variable binaire d'autopartage est maintenant significative à $p < 0,05$. Le modèle M3b.2 ne présente aucun changement dans la significativité ou le signe des autres variables par rapport au modèle M3b.1. Une troisième formulation a été utilisée pour tester si le remplacement du nombre d'arrêts de bus à moins de 400 m par une mesure du niveau de service de transport en commun (le nombre de passages-lignes-directions sur 24 heures accessibles aux arrêts de bus dans une zone tampon de 400 m de marche) permettrait d'améliorer le modèle et de mieux saisir l'influence du transport en commun sur les taux de possession automobile. Cette troisième formulation du modèle (M3b.3) présente un meilleur ajustement aux données (AIC, M3b.2: -4793.8 vs M3b.3: -4821.4) et une valeur inférieure du paramètre λ régulant la force de la dépendance spatiale dans le terme d'erreur (λ , M3b.2: 0,774 par rapport à M3b.3: 0,7671). Une valeur inférieure indique qu'une plus grande dépendance spatiale est expliquée par les variables explicatives incluses.

Les résultats du modèle et des différents tests statistiques pour cette troisième et dernière spécification SDEM sont présentés au Tableau 2-5. Les tests de rapport de vraisemblance avec les modèles plus simples SEM (terme d'erreur décalé uniquement) et SLX (variables explicatives décalées uniquement) ont confirmé que le SDEM est toujours la meilleure spécification. La multicolinéarité a été évaluée à l'aide du facteur d'inflation de la variance (VIF). Le VIF moyen est de 2,67 pour les variables incluses et aucune valeur individuelle n'est supérieure à cinq.

Tableau 2-5 : Résultats du modèle SDEM final (M3b.3)

M3b.3, SDEM avec matrice W: K-plus proches voisins, K = 30					
SDEM	Lamda	0.76705	n	3156	
	Loglikelihood	2431.7	# para.	21	
	AIC	-4821.4			
	AIC (SLX)	-4390.8			
	Nagelkerke Pseudo R2	0.9305			
	Std. Breusch-Pagan Test		44.445, df = 18, p-value = 0.0004981		
	Spatial Hausman Test		30.266, df = 19, p-value: 0.048507		
	Moran's I pour les résidus du SDEM, kn30		-0.00266, SD = -0.5365, p-value = 0.7042		
	Moran's I pour les résidus du OLS, kn30		0.2247, SD = 51.23, p-value < 2.2e-16		
	Moran's I pour les résidus du SLX, kn30		0.1538, SD = 35.15, p-value < 2.2e-16		
LR Test results	SDEM / SLX		432.57, df = 1, p-value < 2.2e-16		
	SDEM / SEM		66.501, df = 7, p-value = 7.5e-12		
		Coeff.	Erreur std.	Value Z	P(> z)
(Intercept)		1.110	0.609	1.82	.0682
log(rev. méd. après imôts des mén.)		0.402	0.014	28.19	< .0001
% de propriétaires		0.271	0.016	16.66	< .0001
% de mén. avec enfants		0.509	0.033	15.40	< .0001
% de pop. âgée de 20-34 ans		0.329	0.049	6.71	< .0001
% de pop. âgée de 65 ans et plus		0.406	0.037	11.08	< .0001
Impacts DIRECTS	log(densité de ménage)	-0.043	0.004	-11.35	< .0001
	Entropie à 5 catégories	-0.081	0.011	-7.25	< .0001
	Passages-lignes de bus aux arrêts, DM 400 m	-8.7E-05	1.3E-05	-6.94	< .0001
	Stations de métro, DM 800 m (1/0)	-0.029	0.008	-3.59	< .001
	Nb. d'épicerie, DM 800 m	-0.003	0.001	-3.57	< .001
	Station autopartage, DM 800 m (1/0)	-0.018	0.007	-2.42	.0156
	LAG: log(rev. méd. après impôts des mén.)	-0.367	0.055	-6.71	< .0001
	LAG : % de propriétaires	0.348	0.091	3.85	< .001
IMPACTS indirects	LAG : % de mén. avec enfants	0.428	0.123	3.49	< .001
	LAG : % de pop âgée de 20-34 ans	-0.120	0.200	-0.60	.5468
	LAG : % de pop âgée de 65 ou plus	0.329	0.197	1.67	.0945
	LAG : log(densité de ménages)	-0.107	0.023	-4.62	< .0001
	LAG : entropie à 5 catégories	-0.103	0.078	-1.33	.1834

Notes : DM = distance de marche

Trois variables décalées ne sont pas significatives (Tableau 2-5): l'entropie à 5 catégories, le % de pop. âgée de 30 à 34 ans et le % de la population âgée de 65 ans et plus, ce qui suggère que l'âge

de la population des zones voisines n'influence pas la possession de voitures dans une AD et que le degré de mixité d'utilisation des sols au-delà de la frontière de chaque aire de diffusion n'a pas non plus d'influence. Tous les coefficients d'impact direct ont le signe attendu, à l'exception du % de pop. âgée de 20 à 34 ans. Malgré l'ajout de nombreuses variables explicatives soutenues par des recherches antérieures et la prise en compte de l'autocorrélation spatiale à travers le terme d'erreur et la présence de variables explicatives décalées, le test de Breusch-Pagan indique la présence d'hétéroscédasticité. Il s'agit d'une limitation importante car l'utilisation d'un estimateur du maximum de vraisemblance est incohérente en présence de perturbations hétéroscédastiques (Kelejian et Prucha, 2010). Pour pallier cette limitation, Kelejian et Prucha (2010) ont développé une forme généralisée de l'estimateur de la méthode généralisée du moment (GMM) qui est robuste à la présence d'hétéroscédasticité. La méthode a été implémentée dans le package *sphet* mis à disposition dans R par Piras (2010). Le modèle final a donc été exécuté à nouveau en utilisant la fonction de ce package et les résultats ont montré des différences mineures dans certaines des estimations de coefficients. Cependant, toutes les variables avaient le même signe et les trois mêmes effets indirects n'étaient pas significatifs (entropie, % de 20 à 34 ans et % de 65 ans et plus). Le paramètre λ est également très similaire avec une valeur de 0,752 (vs 0,767 pour le modèle estimé par maximum de vraisemblance). Pour respecter les limitations d'espace, les résultats de ce modèle robuste à la présence d'hétéroscédasticité ne sont pas rapportés ici mais peuvent être obtenus sur demande.

Enfin, pour évaluer la contribution de chaque variable, cette spécification finale du modèle SDEM a été exécutée à nouveau en retirant chaque variable une par une (Tableau 2-6) et en observant l'impact sur l'ajustement du modèle (AIC) et sur la force du paramètre d'autocorrélation spatiale dans le terme d'erreur (λ).

Tableau 2-6 : Ajustement du modèle final (SDEM M3b.3) à la suite du retrait de chaque variable une à une.

	M3b.3 : SDEM. W defined by k-nearest 30. N = 3156	Lambda (λ)	Nagelkerke Pseudo R2	AIC	AIC DIFF.	Loglike	LR Test, p-value
	M3b.3 : Final model specification	0.7671	0.9305	-4821	REF	2432	REF
DIRECT EFFECT	M3b.3 (-) log(HH Median After-tax income)	0.7424	0.9130	-4116	705.9	2078	2.2E-16
	M3b.3 (-) % of home owner	0.7775	0.9244	-4558	263.9	2299	2.2E-16
	M3b.3 (-) % of HH with child	0.7506	0.9253	-4595	226.5	2317	2.2E-16
	M3b.3 (-) % of pop. aged 20-34 yo	0.7670	0.9295	-4779	42.7	2409	2.3E-11
	M3b.3 (-) % of pop. aged 65 of above	0.7674	0.9278	-4703	118.4	2371	2.2E-16
	M3b.3 (-) log(HH density)	0.7714	0.9277	-4697	124.1	2369	2.2E-16
	M3b.3 (-) Entropy 5 categories	0.7793	0.9293	-4771	50.0	2406	5.5E-13
	M3b.3 (-) Daily bus frequency, WD 400 m [busline*direction*trips over 24 h]	0.7754	0.9294	-4776	45.7	2408	4.8E-12
	M3b.3 (-) Metro stations, WD 800 m (binary)	0.7763	0.9302	-4811	10.8	2425	3.5E-04
	M3b.3 (-) NB of grocery stores, WD 800 m	0.7778	0.9302	-4811	10.6	2425	3.9E-04
	M3b.3 (-) Carsharing station, WD 800 m (binary)	0.7733	0.9304	-4818	3.8	2429	1.6E-02
	INDIRECT EFFECT	M3b.3 (-) LAG : log(HH Median After-tax income)	0.8556	0.9298	-4793	28.0	2417
M3b.3 (-) LAG : % of home owner		0.7994	0.9302	-4810	11.4	2425	2.5E-04
M3b.3 (-) LAG : % OF HH with child		0.7843	0.9302	-4812	9.8	2426	5.8E-04
M3b.3 (-) LAG : % of pop. aged 20-34 yo		0.7668	0.9305	-4823	-1.6	2432	0.5468
M3b.3 (-) LAG : % of pop. aged 65 of above		0.7728	0.9304	-4821	0.8	2430	0.0969
M3b.3 (-) LAG : log(HH density)		0.8188	0.9301	-4806	15.2	2423	3.3E-05
M3b.3 (-) LAG : Entropy 5 categories		0.7786	0.9305	-4822	-0.4	2431	0.2061

Les résultats du Tableau 2-6 confirment que dans cette spécification finale du modèle, toutes les variables directes ont une contribution significative et indépendante au modèle. La transformation logarithmique de la variable de revenu offre la plus grande contribution, suivie du % de propriétaires et du % de ménages avec enfant, tandis que la transformation logarithmique de la densité de ménage arrive en quatrième position. Sur la base des changements d'ajustement du modèle, les deux variables les moins contributives en présence de toutes les autres sont la présence d'une station de métro (binaire) et la présence d'une ou plusieurs stations d'autopartage (binaire), toutes deux situées à moins de 800 m de distance de marche du centre de gravité de l'aire de diffusion. Cependant, le test du rapport de vraisemblance avec le modèle final contenant toutes les variables a confirmé que même la variable la moins contributive (présence de stations d'autopartage) améliore l'ajustement du modèle (5,801; $df = 1$; valeur $p = 0,016$), bien que très légèrement. En termes d'explication de la dépendance spatiale, la suppression des variables décalées significatives conduit à l'augmentation la plus importante de la valeur du paramètre λ . Cela indique que sans ces variables, le modèle doit compenser davantage par un paramètre λ plus fort dans le terme d'erreur pour réduire à zéro la dépendance spatiale dans les résidus. En d'autres termes, ce sont les variables décalées, notamment le revenu et la densité, qui contribuent le plus à expliquer la dépendance spatiale des taux de motorisation des ménages observés.

2.3.7 Discussion

La spécification finale du modèle a montré que tous les impacts directs sont significatifs, indiquant que ce qui se passe à l'intérieur des frontières de chaque AD influence considérablement les taux de possession automobile. Des revenus plus élevés, une proportion plus élevée de propriétaires et une proportion plus élevée de ménages avec enfant sont tous associés à des niveaux plus élevés de possession automobile par les ménages, ce qui est conforme à la littérature. Les variables d'âge ont toutes deux un impact positif, indiquant qu'une proportion plus élevée de personnes âgées et une proportion plus élevée de jeunes adultes (âgés de 20 à 34 ans) sont associées à des niveaux plus élevés de possession automobile par les ménages. Pour les personnes âgées de 20 à 34 ans, l'hypothèse était qu'un pourcentage plus élevé de personnes de ce groupe d'âge serait associé à des taux de motorisation plus faibles compte tenu des retards dans l'acquisition d'une voiture pour la génération actuelle observée à Montréal (Morency et al., 2016). Sinon, cela pourrait indiquer qu'une part importante de ce groupe d'âge vit toujours avec ses parents dans des ménages avec un nombre élevé de véhicules. Il est intéressant de noter que la variable de revenu a un impact indirect négatif indiquant qu'une augmentation des revenus dans les régions voisines entraînerait une baisse des niveaux de possession de voitures. Une explication possible est le processus de gentrification où une augmentation du revenu dans certaines AD conduirait les ménages à faible revenu et possédant moins de véhicules à déménager dans des AD voisines où le logement est encore abordable, réduisant ainsi les niveaux de possession de voitures de ces AD. L'impact indirect pour la proportion de propriétaires et la proportion de ménages avec un enfant est positif et va dans le même sens que les impacts directs, laissant entendre que ces variables ont des effets de voisinage plus larges que les limites des aires de diffusion.

Pour les variables de l'environnement bâti, le logarithme de la densité des ménages a un impact négatif direct sur les niveaux de possession automobile par les ménages, ce qui signifie qu'à mesure que la densité augmente dans l'AD, le nombre de véhicules / ménage diminue. L'impact de la densité semble s'étendre au-delà des frontières de chaque zone car l'impact indirect, représentant les changements de densité dans les régions voisines (moyenne des 30 plus proches AD voisines), est également négatif. La mesure de l'entropie mixte de l'utilisation des sols a

également un impact négatif direct, une valeur plus élevée indiquant qu'une plus grande diversité des utilisations des sols est associée à des niveaux inférieurs de possession automobile, ce qui est conforme à la littérature (Sun et al., 2014). L'entropie dans les régions voisines (impact indirect) ne semble cependant pas jouer un rôle suggérant que c'est la diversité très locale, mais pas régionale, qui est importante. Le niveau de service du réseau d'autobus, la présence de stations de métro et le nombre d'épiceries accessibles à distance de marche sont tous associés à des valeurs plus faibles de véhicules / ménage. Quant à l'accessibilité à l'autopartage, une première formulation testait le nombre de véhicules d'autopartage disponibles dans une zone tampon de 800 m de distance de marche, mais cette variable n'était pas significative. Cependant, il est possible que le *nombre* de véhicules d'autopartage disponibles pourrait ne pas saisir de manière adéquate l'influence de l'autopartage sur les décisions relatives aux véhicules des ménages. De plus, les services d'autopartage sont concentrés dans les quartiers centraux faisant en sorte que 44% des AD n'ont aucun véhicule Communauto accessible dans un périmètre de marche de 800 m. Dans la spécification finale du modèle, une variable binaire représentant la présence d'au moins une station d'autopartage (qui peut avoir plusieurs véhicules) a été incluse. Cette variable est significative et négative, ce qui indique que l'accessibilité aux services d'autopartage est associée à des niveaux inférieurs de possession d'une voiture, tout en maintenant tout le reste constant. Pour être cohérent avec la façon dont ces quatre variables d'accessibilité sont mesurées, elles ne sont pas décalées spatialement, comme indiqué précédemment.

La contribution de chaque variable a été évaluée en comparant le changement d'ajustement du modèle lorsque celle-ci est retirée de la spécification finale du modèle. Le test du rapport de vraisemblance indique que la variable produisant les plus petits changements dans l'ajustement du modèle, la présence d'une ou de plusieurs stations d'autopartage dans une zone tampon de distance de marche de 800 m, améliore encore de façon significative l'ajustement. Sans surprise, c'est l'impact direct du revenu qui a le plus d'impact sur l'ajustement du modèle, suivi par la proportion de propriétaires et la proportion de ménages avec enfants. En général, il semble que les variables sociodémographiques contribuent davantage à expliquer les niveaux de possession automobile que les caractéristiques de l'environnement bâti, ce qui contraste avec certaines recherches antérieures (Sun et al., 2012), bien que le revenu n'ait pas été inclus dans cette étude et que celle-ci ait examiné les ménages à l'aide de modèles désagrégés. Néanmoins, le cadre de modélisation proposé ici confirme que les caractéristiques de l'environnement bâti (densité, diversité), le niveau de service de transport en commun, la présence d'opportunités commerciales tels que les épiceries et la disponibilité de services d'autopartage sont associés à des niveaux inférieurs de possession automobile et réduisent davantage la corrélation spatiale restante observée dans les résidus. Bien que la causalité ne puisse être démontrée, les résultats peuvent être considérés comme une indication que l'augmentation de ces variables par une politique spécifique pourrait conduire à un besoin réduit en motorisation. Bien que la relation entre la possession automobile, les caractéristiques de l'environnement bâti, l'auto-sélection résidentielle et les comportements de déplacements soit complexe, avec de nombreux effets endogènes se nourrissant les uns des autres, des recherches antérieures ont tendance à indiquer que les ménages avec moins de véhicules ont tendance à faire moins de déplacements en voiture et parcourir de plus petites distances en voiture (Sioui et al., 2013; Sun et al., 2014), soutenant l'idée que la réduction du besoin de posséder une voiture pourrait conduire à une utilisation réduite de la voiture.

Le cadre de modélisation présenté dans cette section a montré que lors de la modélisation de la possession automobile (véhicules / ménage) à une échelle géographique fine, les modèles avec une interaction spatiale (SAR, SLX et SEM) peuvent être écartés au profit de modèles plus

complexes comme le Modèle Spatial Durbin (SDM) avec des variables exogènes et endogènes décalées ou le modèle d'erreur Spatial Durbin (SDEM) avec variables exogènes décalées et un décalage spatial sur le terme d'erreur. S'appuyant sur les recommandations de LeSage (2014), le choix du SDEM comme spécification finale a été guidé par des considérations théoriques concernant la nature locale des effets d'entraînement dans le cas de la possession automobile. L'argument est que les effets spatiaux sont principalement locaux avec des changements dans une variable explicative d'un côté de la ville peu susceptibles d'affecter les taux de possession automobile de l'autre côté de la ville. La variable dépendante étudiée, le nombre de véhicules / ménage dans une aire de diffusion présente un indice de Moran d'autocorrélation spatiale de 0,702 avec ses 30 plus proches voisins. Deux premières spécifications de modélisation utilisant deux ensembles potentiels de variables explicatives sociodémographiques sont capables d'expliquer une partie importante de la dépendance spatiale observée mais présentent toujours de fortes corrélations spatiales résiduelles lors de l'utilisation d'un modèle linéaire OLS (Indice de Moran de 0,28 pour l'ensemble A et de 0,36 pour l'ensemble B lors de l'utilisation d'une structure de voisinage à 30 plus proches voisins). L'ajout à l'ensemble B d'un ensemble de six variables décrivant divers aspects de l'environnement bâti (densité des ménages, mixité d'utilisation des sols, niveau de service des bus, accessibilité aux stations de métro, aux stations d'autopartage et aux épicerie) ramène la statistique à 0,225 pour les résidus d'un modèle de régression linéaire standard et encore plus bas à 0,154 lorsque les variables décalées sont incluses. Cela laisse encore une dépendance spatiale statistiquement significative dans les résidus, ce qui, avec la présence d'hétéroscédasticité dans les modèles spatiaux, indique qu'il pourrait y avoir une ou plusieurs autres variables explicatives qui sont actuellement omises. Les variables potentiellement omises sont 1) certaines mesures de l'offre de stationnement sur rue et hors rue qui ont été démontrés hautement importantes pour expliquer la possession automobile au niveau des ménages (Guo, 2013a), 2) les attitudes à l'égard de la voiture, du transport et du style de vie où les personnes ayant des préférences similaires ont tendance à se regrouper dans les mêmes quartiers (Van Acker et al., 2014) et 3) des mesures de l'accessibilité à l'emploi en transport en commun, en voiture ou une combinaison des deux 4) une mesure des lieux d'emploi relatifs à chaque aire de diffusion modélisée.

2.3.8 Conclusion

Les taux de possession automobile ont été examinés à l'aide de modèles économétriques spatiaux avancés qui étudient la dépendance spatiale dans de petites unités géographiques (environ 400 à 700 habitants) à l'aide de données administratives. Cette résolution fine a permis d'utiliser plus de variables explicatives que les modèles agrégés précédents de possession automobile. Le cadre de modélisation a confirmé que les variables sociodémographiques expliquent une grande partie de la dépendance spatiale observée, mais que les caractéristiques de l'environnement bâti, y compris le niveau de service du transport en commun, jouent un rôle. Cependant, l'ensemble des variables explicatives incluses n'a pas pu expliquer toute l'autocorrélation spatiale restante dans les résidus du modèle linéaire, ce qui indique que certaines variables importantes sont omises. Le terme d'interaction spatiale dans le terme d'erreur du modèle d'erreur spatial de Durbin permet l'interprétation du modèle malgré ces omissions et la formulation finale produit un pseudo- R^2 de Nagelkerke de 0,93, expliquant ainsi une grande partie de la variabilité observée dans les taux de possession automobile des ménages sur l'île de Montréal.

Une limitation importante est la présence d'hétéroscédasticité dans les spécifications finales du modèle, spatiale ou non, conduisant potentiellement à des coefficients biaisés. Une cause potentielle est la répartition irrégulière des zones et la variation des dénombrements de

population des aires de diffusion. Pour évaluer les impacts de cette limitation, une formulation du modèle SDEM final robuste à la présence d'hétéroscédasticité en utilisant un estimateur de la méthode généralisée du moment (GMM) au lieu de l'estimateur par maximum de vraisemblance a été testée. Les résultats ont montré des différences mineures dans les estimations des coefficients, mais aucun changement au niveau des signes des variables et des seuils de significativité.

Une autre limite du modèle utilisé dans cette analyse est qu'il n'intègre pas les effets endogènes des décisions de localisation résidentielle et des décisions de possession automobile. Ces effets devraient être incorporés dans les recherches futures sur la dépendance spatiale de la motorisation des ménages. D'autres résolutions spatiales devraient également être testées pour évaluer si les impacts observés des variables incluses sont susceptibles de changer, conduisant ainsi à des recommandations politiques publiques différentes. Les recherches futures devraient également essayer de valider les résultats obtenus avec des données similaires provenant d'autres villes et d'autres pays.

2.3.9 Remerciements

Le financement a été assuré par les partenaires de la Chaire Mobilité de Polytechnique Montréal, de la Chaire sur la transformation des transports, par le Fond de Recherche Nature et Technologie du Gouvernement du Québec (FRQNT) et par le CIRRELT. Les auteurs tiennent à remercier la Société d'assurance automobile du Québec (SAAQ) pour avoir fourni sur demande l'ensemble de données principal de cette étude. Le premier auteur tient à remercier le GeoTrans Lab de l'Université de Californie à Santa Barbara pour la collaboration qui a rendu cette recherche possible.

2.4 Mesure des changements dans les comportements de déplacement multimodaux dus à l'amélioration de l'offre de transport

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

2.4.1 Introduction

Cocktail transport, multimodalité/intermodalité et mobilité intégrée (MaaS : *Mobility as a Service* en anglais) sont des termes de plus en plus à la mode dans le domaine des transports urbains. Dans un contexte où l'offre de transport se diversifie, ces concepts sont généralement présentés comme essentiels pour pouvoir évoluer vers une mobilité plus durable. L'émergence de nouveaux services de mobilité et leur combinaison avec les modes de transport classiques permettent en effet de proposer des alternatives à l'utilisation exclusive d'une automobile privée. Dans cette perspective, de nombreux projets se sont concentrés sur le développement de technologies (telles que des applications mobiles) visant à intégrer plusieurs modes de transport. Cependant, peu de recherches ont été menées pour mieux comprendre les comportements multimodaux des voyageurs, leurs attributs et leurs motivations. De même, peu d'outils ont été proposés pour quantifier et expliquer la variabilité d'utilisation des modes de transport. Par conséquent, il reste difficile pour les planificateurs de mesurer les impacts des stratégies mises en œuvre pour promouvoir une mobilité plus diversifiée.

Devant un tel constat, cette contribution de recherche doctorale - publiée dans un article (Deschaintres et al., 2021) - vise à évaluer l'effet de l'offre de transport sur l'évolution du niveau de multimodalité des comportements de déplacement pendant une période de 5 ans. Cela implique d'abord de définir un indicateur permettant de résumer les intensités d'utilisation de plusieurs modes de transport. En guise d'application, cet indicateur sera calculé par type de personnes (agrégées par attributs socio-démographiques et spatiaux) à partir des deux dernières enquêtes Origine-Destination de Montréal (2013 et 2018). Il s'agira ensuite de croiser l'évolution de la multimodalité des comportements par type de personnes entre les deux enquêtes avec la bonification de 3 modes (transport en commun, vélopartage et autopartage). Pour ce faire, une méthode d'inférence causale sera appliquée. Ainsi, ce travail s'inscrit dans l'objectif de fournir des outils pour guider les interventions stratégiques visant à accroître la multimodalité de la mobilité.

2.4.2 Revue de la littérature

Le faible nombre d'études réalisées sur la multimodalité des comportements de déplacement est principalement dû à un manque de données. En effet, cette analyse nécessite des données sur plusieurs jours pour plusieurs modes de transport. Or, historiquement, peu d'informations étaient recueillies sur la variabilité d'utilisation des modes dans les enquêtes de déplacements. Jusqu'en 1980-1990, ces dernières étaient centrées sur la voiture et les transports en commun, les déplacements effectués avec des modes non motorisés n'étant souvent même pas enregistrés. En outre, elles ne comprenaient généralement pas de questions sur la séquence de modes empruntés, et encore moins sur les segments de déplacements en direction (*access travel*) ou en provenance (*egress travel*) du ou des modes principaux utilisés (Clifton & Muhs, 2012). Même lorsque cette information est connue, beaucoup d'enquêtes restent encore basées sur le concept de « mode de transport principal », où chaque déplacement est représenté par un seul mode central (Kagerbauer et al., 2015). Par ailleurs, les comportements de mobilité doivent être suivis sur plusieurs jours de données pour soutenir l'étude de la multimodalité au niveau individuel,

c'est-à-dire l'utilisation de différents modes de transport dans le temps (Kuhnimhof et al., 2006). Les travaux de quelques auteurs qui ont bénéficié de telles données sont décrits ci-dessous.

2.4.2.1 Analyse de la mobilité multimodale

Le concept de multimodalité peut être appliqué aux déplacements, lorsque plusieurs modes sont utilisés pour effectuer un même trajet (on parle alors également d'intermodalité), mais aussi aux personnes, définissant ainsi la multimodalité comme l'utilisation de plusieurs moyens de transport par un même individu sur une période donnée (Diana & Pirra, 2016). À l'échelle du déplacement, les recherches réalisées ont principalement été centrées sur des combinaisons particulières de deux modes de transport ou sur les trajets de longue distance, mais quelques rares auteurs se sont intéressés aux pratiques intermodales dans la mobilité urbaine quotidienne à partir d'enquêtes spécifiques (Kagerbauer et al., 2015; Oostendorp & Gebhardt, 2018). Néanmoins, c'est sur la deuxième définition de la multimodalité (au niveau individuel) que la plupart des recherches ont porté afin de mieux comprendre les comportements de déplacement dans un contexte où les options de mobilité se diversifient.

En particulier, plusieurs travaux se sont basés sur des enquêtes nationales allemandes : la MOP, une enquête par panel sur 7 jours, et la MiD, une enquête transversale sur une seule journée mais contenant des questions rétrospectives sur la fréquence d'utilisation de plusieurs modes de transport (Kuhnimhof et al., 2010; Kuhnimhof et al., 2006; Nobis, 2007). Dans ces études, la multimodalité des individus est définie comme l'utilisation de plus de deux modes de transport en une semaine, les modes de transport considérés étant l'automobile, le transport collectif et le vélo. Des chercheurs ont également examiné l'évolution de la multimodalité (mesurée par le pourcentage de personnes multimodales). Des analyses générationnelles (Kuhnimhof et al., 2011) ont permis de détecter une réduction de la dépendance à la voiture chez les jeunes en Allemagne et en Grande-Bretagne, en partie due à une variabilité modale croissante. D'après les résultats obtenus, les jeunes d'aujourd'hui ont tendance à utiliser davantage de modes alternatifs, et ont donc un comportement de déplacement plus diversifié. Dans le contexte américain, des tendances similaires ont été révélées à partir de l'enquête nationale NHTS (Buehler & Hamre, 2015). Au-delà des simples analyses descriptives, des méthodes plus complexes telles que l'analyse d'association (Diana, 2012) ou la segmentation (Molin et al., 2016) ont également été appliquées pour déterminer différents types de comportements multimodaux.

En outre, la mobilité multimodale peut être analysée au niveau systémique en utilisant des flux de données passifs et des méthodes d'exploration de données (Morency et al., 2020; Morency et al., 2018). Les analyses croisées des auteurs cités ont mis en évidence des corrélations d'usage entre plusieurs modes de transport dans l'espace et le temps.

2.4.2.2 Quantification du niveau de multimodalité

La mesure de la multimodalité des comportements de déplacement au niveau individuel a fait l'objet d'encore moins d'attention. De plus, les limites des indicateurs les plus couramment utilisés ont été pointées (Heinen & Chatterjee, 2015). En effet, la multimodalité des personnes est généralement évaluée à l'aide de simples statistiques comme le pourcentage de voyageurs qui utilisent un nombre donné de modes de transport. La fréquence d'utilisation de chaque mode n'est souvent pas considérée. Toutefois, quelques indicateurs plus avancés ont été récemment proposés afin de mesurer la variabilité des intensités d'utilisation de plusieurs moyens de transport. Des indices appliqués dans d'autres disciplines telles que l'économie pour évaluer l'inégalité ou l'hétérogénéité de valeurs distribuées ont été adaptés à cette fin : par exemple, l'indice de Gini (Xiao et al., 2020), l'indice de Herfindahl-Hirschman (Heinen & Chatterjee, 2015) ou l'entropie de Shannon (Diana & Mokhtarian, 2009).

La plupart de ces indicateurs ont été rassemblés et comparés dans un cadre conceptuel proposé par Diana et Pirra (2016). Les auteurs ont évalué leur applicabilité dans un contexte de transport en fonction de différentes propriétés. Par analogie avec trois concepts issus de l'étude de la diversité en biologie (richesse des espèces, uniformité et dominance), les auteurs ont souligné la nécessité de prendre en compte le nombre de modes de transport, la distribution relative de leurs intensités d'utilisation et la valeur absolue de l'intensité d'utilisation du mode dominant. Deux enjeux majeurs dans la quantification de la multimodalité ont également été abordés dans cet article. Premièrement, le choix de l'unité de mesure des intensités d'utilisation n'est pas anodin. Le fait de considérer le nombre de déplacements, de segments de déplacement, les temps de trajet ou les distances conduit à des résultats différents. Le deuxième enjeu porte sur le niveau d'agrégation des modes (hypothèses d'indépendance des alternatives). Par exemple, doit-on considérer le transport en commun comme un mode à part entière, ou faire la distinction entre le bus, le métro et le train ? Ces questions n'ont pas encore été traitées dans la littérature et devront faire l'objet d'analyses de sensibilité.

2.4.2.3 Facteurs affectant la multimodalité des comportements

En utilisant les indicateurs mentionnés précédemment comme variables dépendantes de modèles de régression ou en cherchant à prévoir l'appartenance à des groupes de comportements multimodaux, certains auteurs ont identifié des prédicteurs de la variabilité modale (Buehler & Hamre, 2015; Heinen & Chatterjee, 2015; Nobis, 2007; Scheiner et al., 2016). Les variables socio-démographiques ont été les plus étudiées. De manière générale, les personnes situées aux deux extrémités de la pyramide des âges (jeunes et personnes âgées) démontrent des niveaux de multimodalité plus élevés. Le niveau d'éducation et les revenus sont également positivement corrélés à la diversité des modes empruntés. Toutefois, l'utilisation unimodale de la voiture est plus probable chez les employés à temps plein et les personnes ayant de jeunes enfants. L'accès à la voiture a également un impact négatif sur la multimodalité, alors que la possession d'un vélo ou d'un abonnement au transport en commun a au contraire un effet positif. En outre, les événements marquants de la vie sont associés de manière significative à des changements du niveau de multimodalité (Scheiner et al., 2016). Par exemple, l'entrée dans la vie professionnelle et le départ d'un enfant du ménage entraînent une augmentation de la multimodalité. En remarquant ces relations entre le comportement modal et les caractéristiques socio-démographiques, plusieurs auteurs ont parlé de « styles de modalité » (*modality styles*) (Heinen & Chatterjee, 2015; Vij et al., 2011). Ce concept suppose la prédisposition d'une personne à choisir un ensemble de modes de déplacement en fonction de ses habitudes et de son mode de vie. Les personnes multimodales seraient ainsi plus susceptibles de modifier leur comportement et auraient une attitude plus positive à l'égard des modes de transport alternatifs (Heinen, 2018; Molin et al., 2016).

La variabilité du choix du mode de transport peut également s'expliquer par des facteurs temporels exogènes tels que la saisonnalité, les activités sociales, les interruptions de service ou les conditions météorologiques (Lepage & Morency, 2020; Morency et al., 2018). En ce qui concerne la dimension spatiale, la multimodalité tend à être plus élevée dans les centres urbains densément peuplés, en particulier lorsqu'un accès à un réseau de métro est fourni (Buehler & Hamre, 2015; Diana, 2012; Heinen & Chatterjee, 2015). Cette interaction avec l'environnement urbain est liée à la plus grande disponibilité des services de transport. De nombreux auteurs ont exploré l'effet de l'offre de transport et des services de mobilité émergents sur l'utilisation d'autres modes spécifiques, la voiture ou le transport en commun principalement (Becker et al., 2018; Campbell & Brakewood, 2017). Cependant, aucun d'entre eux n'a analysé leur influence sur les niveaux de multimodalité.

2.4.3 Méthodologie

Deux principales sources de données sont exploitées dans cette recherche. D'une part, les informations sur les comportements de mobilité proviennent de l'enquête Origine-Destination de Montréal (Québec, Canada). Cette enquête téléphonique (et web depuis 2018) est menée tous les cinq ans dans la région métropolitaine de Montréal pour collecter les déplacements d'environ 4 à 5 % des ménages résidents au cours d'un jour de semaine typique d'automne. Les deux dernières enquêtes, soit celles de 2013 et 2018 (78 731 et 75 266 ménages respectivement), sont utilisées. Toutes deux ont été pondérées à l'aide des données du recensement canadien, de sorte que les résultats sont représentatifs de la population du Grand Montréal. Ces enquêtes contiennent des variables aux niveaux du ménage, de l'individu (pour tous les membres du ménage) et du déplacement. En particulier, la séquence des modes empruntés est disponible pour chaque déplacement enregistré, les modes considérés étant l'automobile (conducteur et passager), le métro, le bus, le bus scolaire, le train, le taxi, le vélo, la marche, le transport adapté et d'autres modes (incluant les modes interurbains). D'autre part, les informations sur l'offre de transport sont issues de plusieurs sources de données. Pour chaque mode, des informations transversales ont été rassemblées pour deux années (2013 et 2018 lorsque cela était possible) afin de mesurer des changements sur une période de cinq ans. Le réseau routier est représenté à l'aide des données ouvertes du recensement canadien de 2011 et de 2016. Les services planifiés de transport en commun sont tirés des fichiers GTFS des organismes de transport de la région de Montréal pour les périodes d'automne 2013 et 2018. Par ailleurs, des données transactionnelles de vélopartage et d'autopartage ont été fournies respectivement par BIXI et Communauto, les entreprises montréalaises de ces services, pour les mêmes périodes. Basée sur ces données, la méthodologie proposée (illustrée dans la Figure 2-24) comprend différentes étapes.

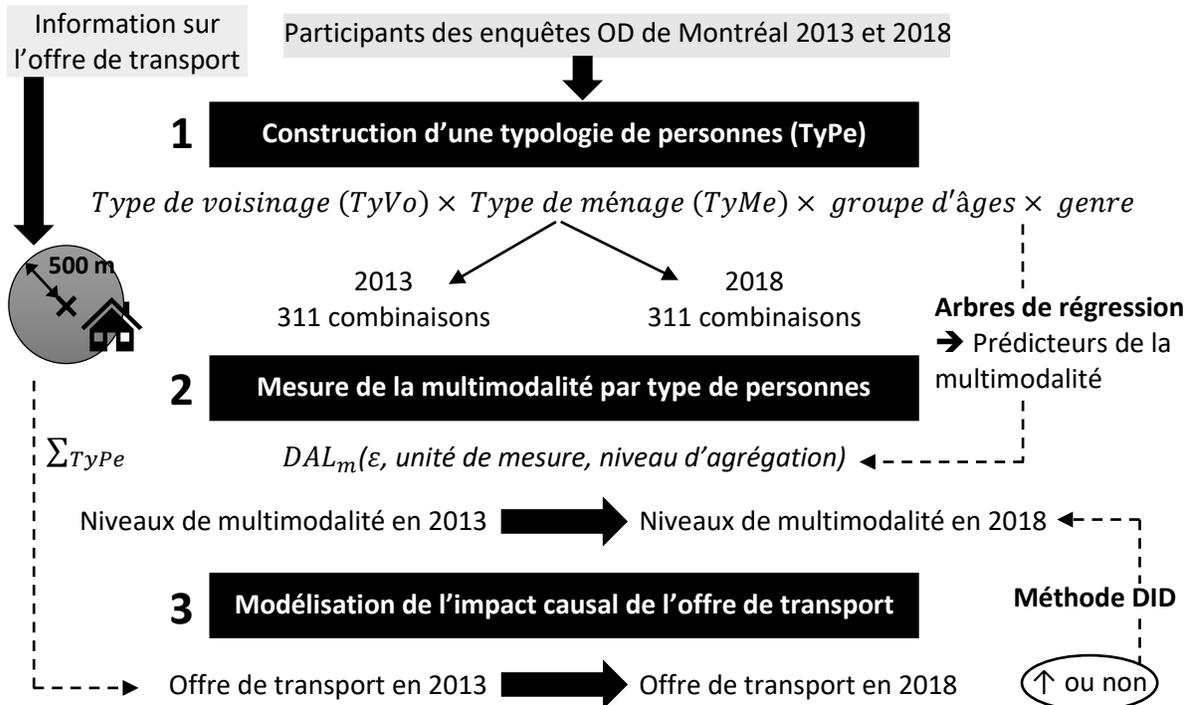


Figure 2-24 Schéma général de la méthodologie

Premièrement, les participants de chaque enquête sont segmentés en plusieurs groupes en fonction de leurs attributs socio-démographiques et spatiaux. Cette typologie empirique est nécessaire car les données de l'enquête OD, disponibles pour un jour typique seulement, ne sont pas suffisantes pour mesurer la multimodalité au niveau individuel (des carnets de déplacements sur plusieurs jours seraient requis pour pouvoir considérer les personnes individuellement). Par conséquent, ce travail évalue la multimodalité par type de personnes plutôt que par personne en utilisant des intensités d'utilisation modale agrégées. Les données de l'enquête OD n'étant pas collectées par panel, cette agrégation permet également de mesurer des changements dans les niveaux de multimodalité de deux mêmes types de personnes observés dans deux enquêtes transversales à cinq ans d'intervalle. Pour ce faire, un indicateur mesurant la diversité d'utilisation des modes de transport est calculé par type et son évolution entre 2013 et 2018 est analysée. Enfin, les meilleurs prédicteurs de la multimodalité (estimée par l'indicateur choisi) sont déterminés. Plus précisément, l'impact causal de l'amélioration de l'offre de transport est modélisé en utilisant une approche par doubles différences. Plus de détails sur les méthodes appliquées sont donnés dans les sections suivantes.

2.4.3.1 Construction d'une typologie de personnes

Les participants (répondants et autres membres du ménage) aux deux enquêtes considérées sont empiriquement regroupés en fonction de quatre attributs : le type de voisinage du lieu de résidence, le type de ménage, le groupe d'âges et le genre. Une typologie de voisinages et une typologie de ménages (toutes deux basées sur des variables définies à l'échelle du ménage) sont donc d'abord créées. À des fins de comparaison, ces deux typologies sont communes aux enquêtes de 2013 et 2018 (tous les ménages des deux enquêtes sont pris ensemble). Pour plus de clarté, les codes suivants seront utilisés dans la suite du texte pour désigner chaque typologie: TyPe pour le type de personne, TyVo pour le type de voisinage et TyMe pour le type de ménage.

La méthode de segmentation appliquée pour construire la typologie de voisinages est inspirée d'un mémoire de maîtrise (Martel-Poliquin, 2012). Huit variables sont calculées dans un rayon de 500 mètres autour du lieu de résidence de chaque ménage. Les trois premières variables caractérisent l'utilisation du sol, les cinq autres variables décrivent l'offre de transport disponible pour différents modes :

- la densité de population,
- la densité d'emplois,
- la densité commerciale,
- la longueur totale du réseau routier,
- la densité d'intersections,
- le nombre total de passages-arrêts en transport en commun (bus et métro confondus) cumulés sur 24 heures,
- le nombre total de points d'ancrage dans les stations de vélopartage à proximité,
- et la capacité totale (en nombre de véhicules) des stations d'autopartage à proximité.

Les trois premières densités sont évaluées à l'aide des données d'enquête, la densité de population étant la somme du nombre de personnes vivant dans les ménages voisins, la densité d'emplois le nombre de destinations de déplacements pour le motif travail et la densité commerciale le nombre de destinations de déplacements pour le motif magasinage. Les variables relatives au réseau routier (longueur totale et densité d'intersections) sont estimées à partir du recensement canadien, tandis que les passages-arrêts en transport en commun (bus et métro confondus) sont sommés sur 24 heures à partir des fichiers GTFS. Les capacités des stations de

vélopartage et d'autopartage (en nombre de points d'ancrage et de véhicules respectivement) fluctuant dans le temps, elles sont calculées comme le nombre maximum de vélos ou de véhicules différents disponibles dans les stations au cours de l'année. Toutes ces variables sont ensuite normalisées et l'algorithme des K-moyennes est appliqué. Le nombre de groupes est choisi grâce à une méthode en deux étapes consistant à faire 30 groupes préalables avec la méthode des K-moyennes, puis à dessiner un dendrogramme avec les centres obtenus.

La méthode employée pour construire la typologie des ménages a été développée dans un article précédent par Fabre et Morency (2019). Les ménages sont segmentés en appliquant à nouveau l'algorithme de K-moyennes basé sur les attributs suivants :

- l'âge moyen des membres du ménage,
- l'amplitude maximale des âges dans le ménage,
- le nombre de membres dans le ménage,
- le nombre d'enfants âgés de 12 ans et moins,
- et le nombre de personnes âgées de 76 à 84 ans.

Six types de voisinages (TyVo) et huit types de ménage (TyMe) sont ainsi produits (voir la section des résultats). En outre, cinq classes d'âges ([0;15[, [15;25[, [25;40[, [40;65[, 65 ans et plus]) et deux genres (homme ou femme) sont considérés. Par conséquent, 480 combinaisons sont possibles pour chaque enquête (les données de 2013 et 2018 sont d'abord traitées séparément pour être comparées par la suite). Toutefois, les combinaisons contenant moins de 10 observations sont supprimées, puis seules les combinaisons communes aux deux années sont sélectionnées. Cela conduit à 311 combinaisons différentes (ou types de personnes - TyPe) par an, qui regroupent presque tous les participants aux deux enquêtes (99,9% des 282 583 personnes qui ont effectué au moins un déplacement pendant la journée enquêtée).

2.4.3.2 Définition d'un indicateur de multimodalité

L'indicateur sélectionné pour mesurer la multimodalité est une variante de l'indice Dalton. Dans un article précédent (Diana & Pirra, 2016), plusieurs indices ont été comparés de manière théorique et celui-ci semblait avoir des propriétés intéressantes pour évaluer la diversité d'utilisation des modes, notamment parce qu'il est très sensible aux différences d'intensité. De plus, sa formule mathématique intègre un paramètre permettant d'ajuster la sensibilité de l'indicateur aux plus faibles intensités : il permet de mieux tenir compte des modes les moins utilisés. Cet indicateur est donc particulièrement adapté aux situations dans lesquelles certains modes sont moins utilisés que d'autres, ce qui est le cas à Montréal où la voiture joue un rôle prédominant. Il est à noter que d'autres indicateurs (non présentés dans ce document) ont été testés, mais cet indice s'est avéré être le meilleur.

Variante de l'indice de Dalton

L'indice de Dalton, qui est très similaire à l'indice d'Atkinson, est une mesure d'inégalité souvent utilisée en économie pour déterminer quelle extrémité de la distribution des revenus contribue le plus à l'inégalité observée. Cet indicateur est transposable dans un contexte de transport s'il est appliqué à la distribution des intensités d'utilisation de différents modes. Néanmoins, sa variante DAL_m , proposée par Diana et Pirra (2016) et définie dans l'équation 1, serait encore plus appropriée puisqu'elle considère le nombre réel de modes utilisés m plutôt que le nombre de modes étudiés n , avec f_1, \dots, f_n les intensités d'utilisation correspondantes :

$$DAL_m = 1 - \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^m (f_i^{1-\varepsilon} - 1)}{\left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m f_i\right)^{1-\varepsilon} - 1} \quad (1)$$

L'indicateur diminue avec la multimodalité, donc plus sa valeur est faible, plus le niveau de multimodalité est élevé. Plus précisément, il varie de 0 (utilisation égale de tous les modes) à $(n - 1)/n$ (lorsqu'un seul mode est utilisé). Le paramètre $\varepsilon < 1$, appelé "paramètre d'aversion de l'inégalité" (*inequality aversion parameter*) en économie, représente l'influence décroissante des modes les plus utilisés dans la détermination du degré de multimodalité. Ainsi, des valeurs plus élevées de ε rendent l'indice plus sensible aux intensités d'utilisation des modes les moins utilisés. ε est déterminé de manière empirique par des analyses de sensibilité.

Analyses de sensibilité

DAL_m est calculé par type de personnes (Type) à partir des intensités agrégées (pondérées) f_i par mode, obtenues en additionnant toutes les intensités d'utilisation des individus qui appartiennent au même Type (chaque intensité étant pondérée par le facteur de pondération individuel correspondant). Différentes valeurs variant de 0,1 à 0,9 (par incrément de 0,1) sont testées pour le paramètre ε . La valeur conduisant à la distribution la plus homogène des résultats de l'indicateur est sélectionnée afin de mesurer une plus grande variété de niveaux de multimodalité. De plus, conformément aux deux enjeux majeurs abordés précédemment dans la section 2.4.2, différentes unités d'intensités d'utilisation ainsi que différentes agrégations de modes sont expérimentées. Quatre unités sont considérées :

- le nombre de segments de déplacement,
- le nombre de déplacements,
- la distance de déplacement (en mètres),
- et le temps de parcours (en secondes).

Le nombre de segments de déplacement par mode est calculé à partir des séquences de modes déclarées dans l'enquête. Toutefois, la marche à l'origine et la destination du déplacement, de même que la marche pour se rendre d'un mode à autre (correspondances) n'est pas prise en compte ; cette limite sera discutée plus tard. Pour les intensités en nombre de déplacements, les déplacements unimodaux et multimodaux sont différenciés : les déplacements unimodaux sont additionnés par mode, mais les déplacements combinant plusieurs modes sont regroupés dans une catégorie indépendante appelée « déplacements multimodaux ». Quant aux deux dernières unités, elles sont obtenues en affectant les déplacements sur le réseau à partir des coordonnées des origines et des destinations disponibles dans l'enquête. Deux calculateurs de chemins sont utilisés pour estimer les itinéraires les plus courts : la machine OSRM (*Open Source Routing Machine*) (Luxen & Vetter, 2011) avec des profils personnalisés pour les déplacements effectués en voiture, à pied et à vélo, et l'algorithme *trRouting* de Transition (Bourbonnais, 2019) pour les déplacements en transport en commun. Ces deux outils fournissent la distance et la durée totale de chaque trajet. Cette affectation n'est toutefois possible que pour les déplacements unimodaux (les déplacements bimodaux sont donc négligés dans les deux dernières métriques). En outre, trois niveaux d'agrégation des modes sont définis :

- **AG1** : métro, bus, bus scolaire, train, auto-conducteur, auto-passager, taxi, marche, vélo, autre mode;
- **AG2** : transport en commun, auto-conducteur, auto-passager, marche, vélo, autre mode;

- **AG3** : transport en commun, automobile, transport actif, autre mode.

La première option correspond au niveau le plus désagrégé (presque tous les modes sont considérés comme indépendants). Dans la deuxième option, les modes de transport en commun sont regroupés et le taxi est placé dans la catégorie « autre mode ». Dans la troisième option, la plus agrégée, les modes auto-conducteur et auto-passager sont rassemblés dans « automobile », la marche et le vélo dans « transport actif ». Des analyses de sensibilité sont ainsi effectuées pour définir les paramètres les plus appropriés (ε , unité de mesure et niveau d'agrégation des modes), c'est-à-dire, dans ce cas-ci, les paramètres donnant la distribution la plus proche de la loi normale pour permettre l'application du modèle défini ci-après.

2.4.3.3 Modélisation de l'effet de l'offre de transport par la méthode des doubles différences

L'indicateur proposé précédemment peut être utilisé comme variable dépendante d'un modèle, par exemple un arbre de régression, pour mettre en évidence des variables indépendantes qui ont un effet significatif sur la multimodalité. Toutefois, seules des corrélations (et non des relations de causalité) sont mesurables avec une telle approche. Cette recherche vise plutôt à identifier les causes des changements observés dans les niveaux de multimodalité entre 2013 et 2018 par type de personnes (TyPe). Plus précisément, l'objectif est de comprendre dans quelle mesure l'évolution des comportements de déplacement est due à des changements dans l'offre de transport. Pour ce faire, la méthode des doubles différences est explorée. Cette approche d'inférence causale a déjà été appliquée dans un contexte de transport pour évaluer l'effet des services de mobilité émergents sur les modes de transport traditionnels (Becker et al., 2018; Campbell & Brakewood, 2017). Dans ce travail, il s'agit d'analyser l'effet de l'amélioration de l'offre de transport plutôt que l'apparition d'un nouveau service, sur la multimodalité des comportements de mobilité plutôt que sur l'achalandage d'un mode de transport spécifique.

La méthode des doubles différences permet d'évaluer l'impact causal d'un traitement, d'une politique ou d'une intervention sur une variable d'intérêt. Elle est utilisée lorsque des observations ou des données quasi-expérimentales sont disponibles (c'est-à-dire lorsque le traitement n'a pas été attribué de manière aléatoire, ce qui est le cas des interventions stratégiques en transport). Elle sert ainsi à réduire les biais dus à la nature non aléatoire de l'expérience dans l'estimation de l'effet du « traitement ». Le cas le plus simple est celui dans lequel des résultats sont observés pour deux groupes (un groupe « traité » et un groupe « témoin » ou « contrôle ») à deux périodes différentes. La différence de résultats (en moyenne) entre les deux périodes pour le groupe contrôle est soustraite de la différence entre les deux périodes pour le groupe traité. La différence entre ces deux différences (c'est-à-dire la double différence) est l'effet estimé du traitement (δ). Dans ce cas-ci, l'effet suivant est mesuré :

$$\delta = (E[I_{igt}|g = T, t = 2018] - E[I_{igt}|g = T, t = 2013]) - (E[I_{igt}|g = C, t = 2018] - E[I_{igt}|g = C, t = 2013]) \quad (2)$$

avec I_{igt} l'indicateur de multimodalité du type TyPe i qui appartient au groupe g mesuré au temps t (2013 ou 2018). L'appartenance à un groupe est basée sur l'évolution de l'offre de transport pour un certain mode entre 2013 et 2018 : une bonification a été observée dans le voisinage des types de personnes (TyPe) qui appartiennent au groupe dit traité (i.e. la somme de la variable de voisinage précédemment définie, par exemple le nombre total de passages-arrêts en transport en commun dans un rayon de 500 mètres de tous les lieux d'habitation des personnes appartenant au type TyPe, a augmenté), alors que l'offre de transport a stagné ou diminué dans le groupe témoin. L'équation 2 montre comment la méthode élimine les biais résultant de différences permanentes entre le groupe traité et le groupe témoin (telles que les différences

inhérentes aux attributs socio-démographiques), ainsi que les biais causés par les tendances temporelles ayant le même impact sur les deux groupes. Cependant, en l'absence de traitement, la variable d'intérêt (ici le niveau de multimodalité) est supposée suivre la même tendance dans les deux groupes. Cette hypothèse sera discutée plus loin.

Le modèle correspondant, une régression des moindres carrés ordinaire, est estimé comme suit (équation 3) :

$$I_{it} = \alpha + \beta_0 Annee_t + \beta_1 Groupe_i + \sum_k \gamma_k (Type_k)_i + \delta Groupe_i * Annee_t * \Delta Offre_i + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

L'effet de l'amélioration de l'offre de transport ($Groupe_i * Annee_t * \Delta Offre_i$) est l'interaction entre $Groupe_i$ (variable binaire pour l'appartenance à un groupe : $Groupe_i = 1$ si la variable d'offre agrégée a augmenté pour le type Type i entre 2013 et 2018, $Groupe_i = 0$ sinon) et $Annee_t$ (variable binaire pour l'année : $Annee_t = 1$ pour 2018, $Annee_t = 0$ pour 2013) pondérée par l'augmentation du niveau d'offre $\Delta Offre_i$ (en nombre de passages-arrêts de transport en commun, d'ancrages de vélopartage ou de véhicules d'autopartage) : $\Delta Offre_i = Offre_i(t = 2018) - Offre_i(t = 2013)$. Des variables de contrôle ($Type_k$) sont ajoutées pour capturer l'effet des caractéristiques socio-démographiques et spatiales propres à chaque type de personnes : le type de voisinage (TyVo), le type de ménage (TyMe), le groupe d'âges et le genre.

2.4.4 Résultats

Les résultats sont rapportés en trois parties : la typologie de personnes construite est d'abord présentée, puis la multimodalité mesurée par l'indicateur choisi est analysée par type (Type) et corrélée avec les attributs socio-démographiques et spatiaux des personnes. L'évolution de la multimodalité entre 2013 et 2018 est ensuite exposée, et l'effet de l'amélioration de l'offre de transport sur les changements observés est finalement modélisée pour trois variables : le nombre de passages-arrêts en transport en commun cumulés sur 24 heures, le nombre de points d'ancrage de vélopartage et le nombre de véhicules d'autopartage.

2.4.4.1 Typologie de personnes

Tous les participants aux enquêtes OD 2013 et 2018 de Montréal ont été classés en fonction de la combinaison des quatre attributs suivants : le type de voisinage (TyVo) du lieu de résidence, le type de ménage (TyMe), le groupe d'âges et le genre.

Six types de voisinages (TyVo) ont été déduits de l'algorithme de segmentation décrit précédemment. La Figure 2-25 spatialise les lieux de résidence des ménages (enquêtes 2013 et 2018 combinées) dans chaque groupe. La proportion de ménages appartenant à chaque TyVo est également indiquée entre parenthèses. De plus, la Figure 2-26 fournit les centres des groupes, soit la moyenne des variables normalisées sur lesquelles la segmentation était basée. Les types 1, 2 et 3 regroupent des ménages qui vivent sur l'île de Montréal. Ils sont caractérisés par une forte densité de population, d'emplois et de commerces situés à moins de 500 mètres des lieux de domicile. Ces ménages ont accès à tous les modes de transport, en particulier au réseau de métro et à de nombreuses lignes d'autobus (nombre élevé de passages-arrêts sur 24 heures). Les modes de transport partagés (vélopartage et autopartage basé stations) sont également disponibles à proximité. De plus, la forte densité d'intersections rend ces quartiers propices à la marche. Les voisinages des types 4 et 5 sont majoritaires : ils représentent respectivement 25 % et 29 % des ménages. Les quartiers correspondants sont essentiellement des zones résidentielles. Le réseau routier est particulièrement développé dans les voisinages de type 4. La plupart de ces ménages se trouvent en dehors des zones de desserte des services de mobilité partagée, mais beaucoup

d'entre eux ont encore accès à des lignes de bus ou de train (les principaux axes se dessinent sur les cartes de la Figure 2-25). Au contraire, les ménages ayant un voisinage de type 6 vivent en périphérie, avec un faible accès aux alternatives à l'automobile.

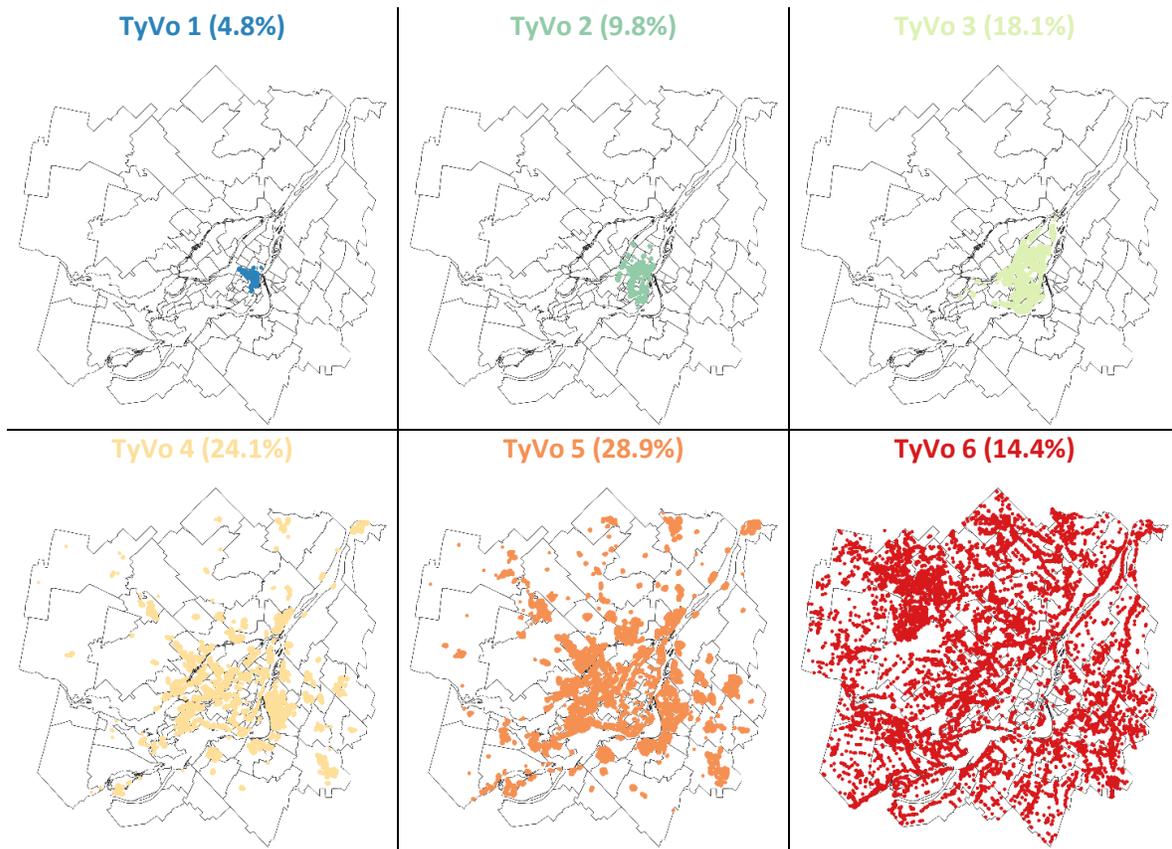


Figure 2-25 Typologie de voisinages (proportion de ménages)

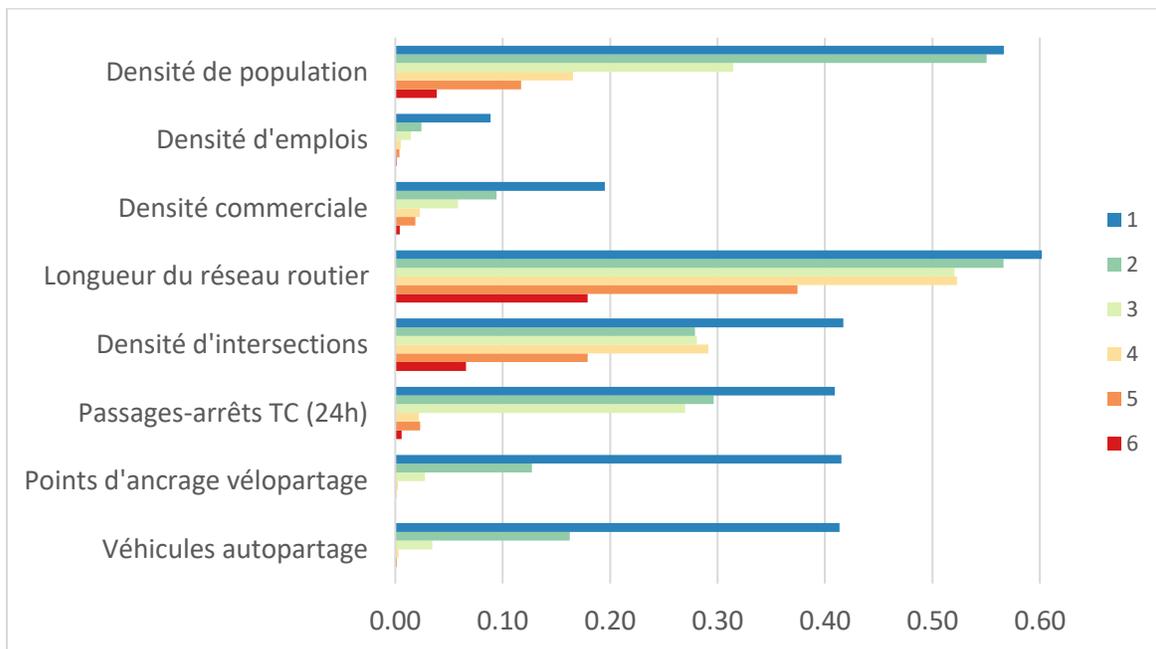


Figure 2-26 Typologie de voisinages – Centres : variables normalisées moyennes par type

Les résultats de la typologie de ménages sont donnés dans la Figure 2-27 (qui représente les ménages en fonction de l'amplitude maximale des âges et de l'âge moyen de leurs membres, la couleur indiquant le type TyMe auquel le ménage appartient) et le Tableau 2-7 (centres, donc variables moyennes des ménages par type). Chaque type de ménages a reçu un nom significatif - le même que dans un article précédent (Fabre & Morency, 2019). Il y a dans cette typologie trois catégories de ménages d'une génération (« jeunes couples, colocs ou célibataires », « cinquantenaires » et « retraités »), quatre types de ménages, de deux générations, composés de parents et d'enfants (« très jeunes familles », « jeunes familles » et « familles traditionnelles ») ou d'adultes et de personnes âgées (« adultes et personnes âgées »), ainsi qu'un type de ménages de trois générations (« familles multigénérationnelles »).

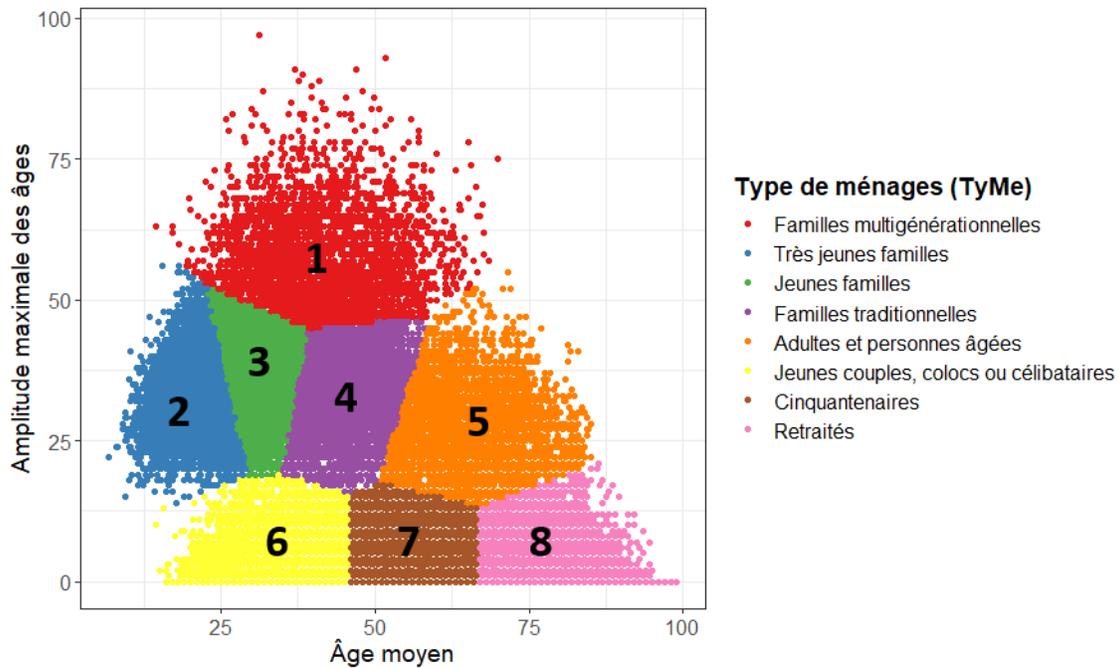


Figure 2-27 Typologie de ménages (en fonction de l'amplitude maximale des âges et de l'âge moyen des membres)

Tableau 2-7 Typologie de ménages – Centres : variables moyennes par type

Type de ménages (TyMe)	Taille (% du nb total de	Nombre de personnes	Âge moyen	Amplitude max des âges	# de personnes de moins de 12	# de personnes âgées de 76 à
1. Familles multigénérationnelles	2.2%	4.06	41.04	56.60	0.65	0.19
2. Très jeunes familles	13.1%	4.03	21.09	33.48	1.72	0.00
3. Jeunes familles	12.6%	3.67	31.31	35.74	0.41	0.00
4. Familles traditionnelles	8.3%	2.96	43.50	33.63	0.00	0.00
5. Adultes et personnes âgées	2.9%	2.49	64.85	27.37	0.00	0.40
6. Jeunes couples, colocs ou célibataires	10.9%	1.63	33.44	2.08	0.00	0.00
7. Cinquantenaires	28.2%	1.60	58.34	2.13	0.00	0.00
8. Retraités	21.9%	1.48	75.05	1.72	0.00	0.44

Sur la base de ces deux typologies qui correspondent à deux attributs du ménage (auquel l'individu appartient) ajoutés à deux attributs individuels (âge et genre), les participants enquêtés ont été placés manuellement dans l'une des 311 combinaisons sélectionnées par an.

2.4.4.2 Multimodalité par type de personnes

L'indice de Dalton revisité défini dans l'équation 1 a été calculé par type de personnes (TyPe) à partir des intensités d'utilisation (pondérées) agrégées sur tous les jours enquêtés. Plusieurs unités de mesure et niveaux d'agrégation de modes ont été testés, de même que différentes valeurs pour le paramètre ε . Les résultats de ces analyses de sensibilité sont affichés dans la Figure 2-28 et la Figure 2-29 sous forme d'histogrammes (en nombre de combinaisons ou types TyPe). Les valeurs obtenues pour les 622 combinaisons (311 combinaisons/an) sont représentées ensemble.

La Figure 2-28 montre que les niveaux de multimodalité sont répartis plus uniformément lorsque les modes de transport en commun sont considérés séparément (niveau d'agrégation AG1). Les valeurs ont tendance à être divisées en deux groupes dans le niveau AG2, ou elles sont concentrées sur le côté gauche dans l'option AG3. En ce qui concerne l'unité de mesure des intensités, le temps de parcours (en vert) conduit à un large éventail de niveaux de multimodalité et la distribution correspondante est proche de la loi normale (hypothèse qui sera nécessaire pour le modèle de régression développé par la suite). En outre, des analyses supplémentaires par essais-erreurs (non présentées dans ce document) ont révélé que le temps de déplacement permettait de mieux faire ressortir les différences dans les comportements de multimodalité entre 2013 et 2018. Par conséquent, le premier niveau d'agrégation des modes et l'unité temporelle (intensités exprimées en secondes) sont sélectionnés : DAL_m (temps) AG1. La Figure 2-29 donne les histogrammes produits en faisant varier le paramètre ε pour cet indicateur (en réalité, de telles analyses ont été réalisées en amont pour chaque indicateur de la Figure 2-28).

Les valeurs de ε comprises entre 0,5 à 0,7 fournissent les distributions les plus homogènes, c'est pourquoi $\varepsilon = 0,6$ est choisi. Cette valeur indique qu'un poids plus élevé doit être attribué aux modes les moins utilisés afin de mieux mettre en évidence la diversité d'utilisation des modes.

Après avoir spécifié l'indicateur de multimodalité, les valeurs obtenues ont été corrélées avec les attributs socio-démographiques et spatiaux des types de personnes (TyPe). Pour ce faire, deux arbres de régression (un avec les 311 combinaisons de 2013, l'autre avec celles de 2018) ont été développés dans le but de prédire l'indicateur sélectionné, soit DAL_m (temps) AG1 avec $\varepsilon = 0,6$. Dans chaque arbre de régression, l'espace formé par les 311 combinaisons est découpé en plusieurs régions et une moyenne est calculée pour obtenir une prévision au sein de chaque région. Toutefois, dans ce travail, les arbres de régression sont utilisés pour identifier les meilleurs prédicteurs de la multimodalité (sélectionnés dans les règles de partitionnement des régions au niveau des nœuds) plutôt que dans un objectif de prévision. Les variables indépendantes incluses dans la construction du modèle sont les quatre variables catégorielles qui caractérisent les combinaisons de personnes (TyPe), c'est-à-dire le type de voisinage (TyVo), le type de ménage (TyMe), le groupe d'âges et le genre. Le package *rpart* du logiciel statistique R a été utilisé, avec la méthode ANOVA. Le même critère d'arrêt (paramètre de complexité) a été fixé pour les deux arbres. Les résultats sont présentés à la Figure 2-30. Le nombre et la proportion de combinaisons ainsi que la valeur moyenne de l'indicateur sont affichés pour chaque partition. L'étiquette inscrite au-dessus de chaque nœud indique la branche de gauche.

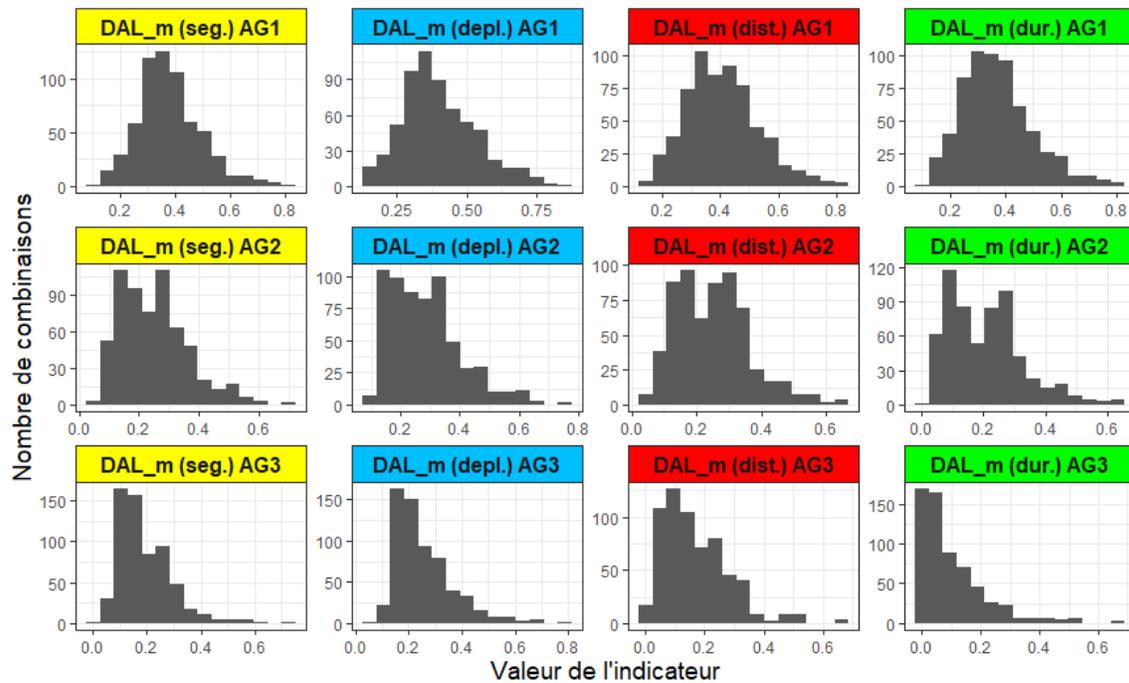


Figure 2-28 Histogrammes de l'indicateur de multimodalité calculé par type de personnes pour différentes unités de mesure des intensités d'utilisation (segments de déplacements, déplacements, distance ou durée de trajet) et différents niveaux d'agrégation des modes (AG1, AG2 ou AG3)

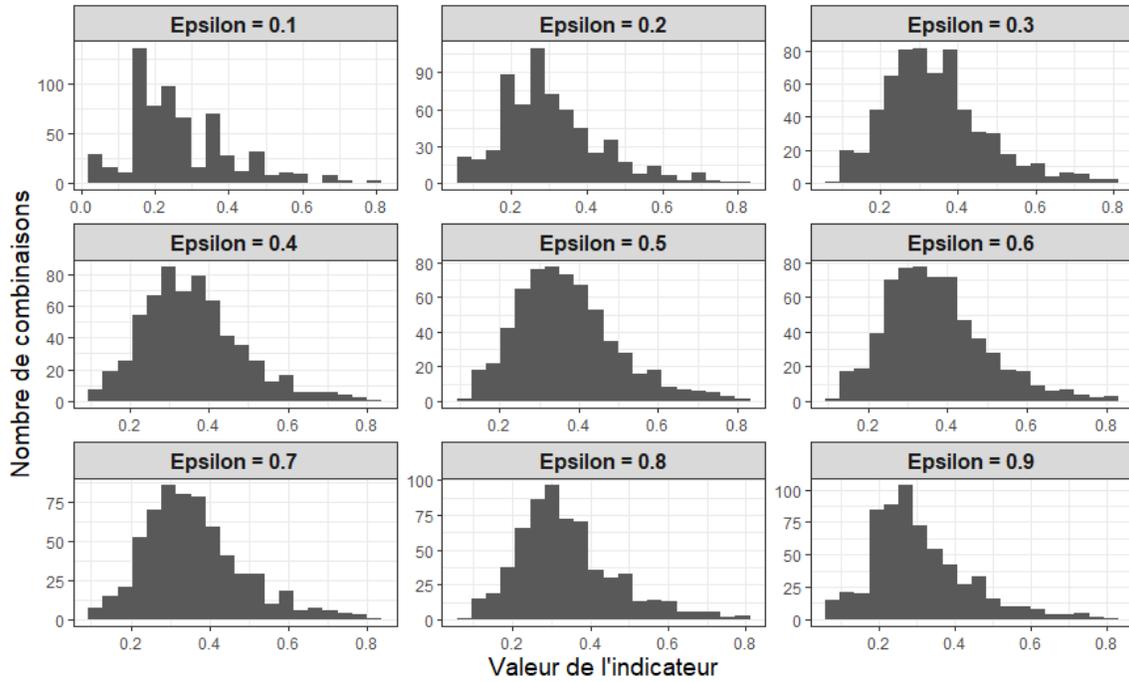


Figure 2-29 Histogrammes de l'indicateur de multimodalité calculé par type de personnes pour différentes valeurs du paramètre ϵ – Exemple pour DAL_m (temps) AG1

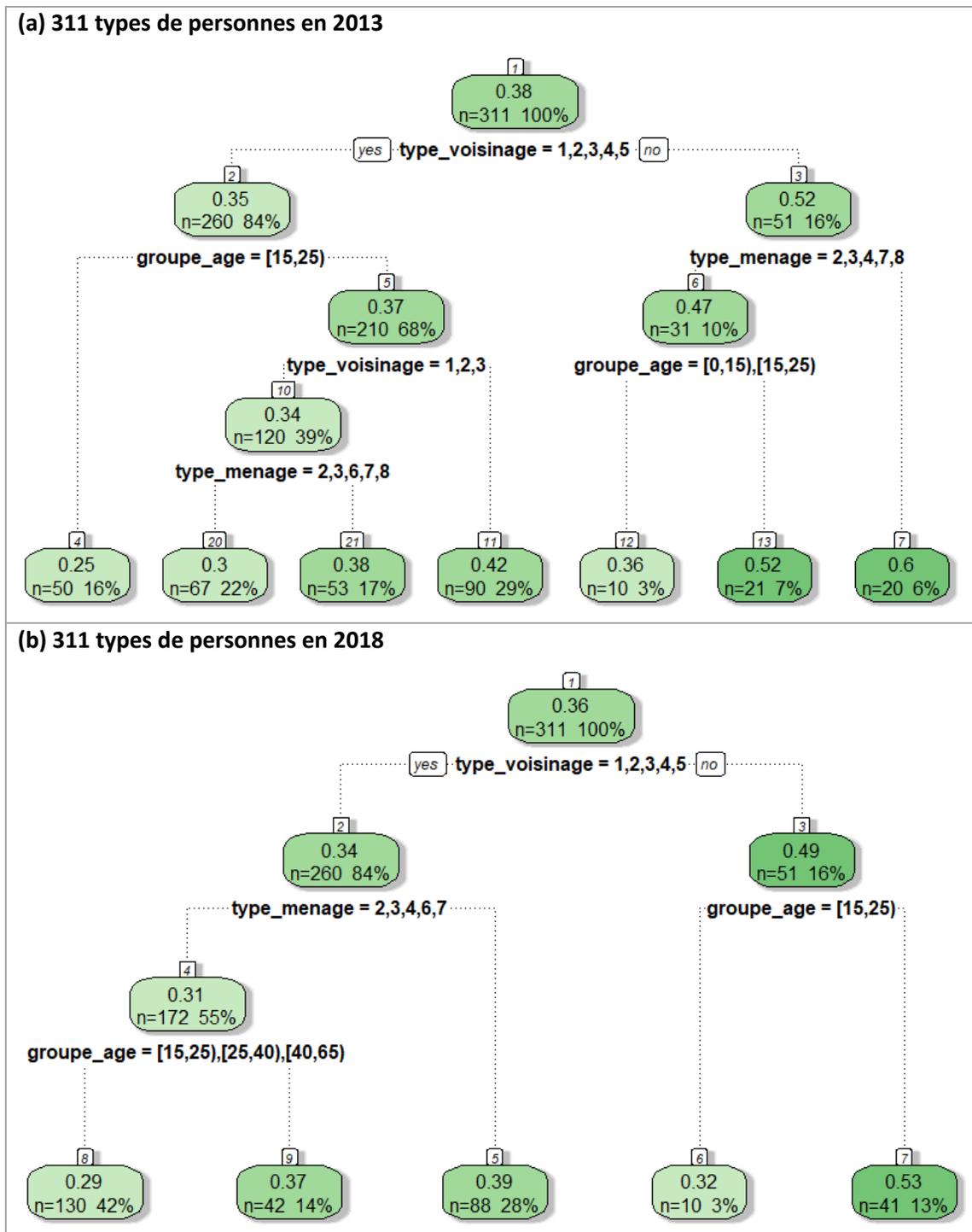


Figure 2-30 Arbres de régression pour la prévision de l'indicateur de multimodalité DAL_m (temps) $AG1 \epsilon=0,6$ calculé par type de personnes (a) en 2013, (b) en 2018

Des arbres similaires ont été obtenus pour 2013 et 2018. Le type de voisinage (TyVo) est la variable la plus importante pour les deux années (puisque la branche principale au sommet des deux arbres est formée en fonction de la valeur prise par cette variable). Les types de personnes ayant un voisinage de type (TyVo) 6 présentent une valeur moyenne de l'indicateur plus élevée, donc des niveaux de multimodalité plus faibles. Inversement, les types (TyVo) 1, 2, 3, 4, 5 sont associés à une plus grande diversité d'utilisation des modes. En 2013, les trois premiers types de voisinage (où tous les modes alternatifs sont disponibles) se distinguent plus loin dans l'arbre par une multimodalité moyenne encore plus grande. Le groupe d'âges et le type de ménage (TyMe) ont également un effet important sur le niveau de multimodalité des comportements. Les très jeunes, jeunes familles et les familles traditionnelles, en particulier leurs membres les plus jeunes, démontrent un plus grand niveau de multimodalité. Les personnes âgées de 15 à 24 ans ont une utilisation particulièrement diversifiée des modes. En outre, les jeunes couples, les colocataires et les célibataires, ainsi que les personnes d'une cinquantaine d'années et les retraités, ont tendance à être plus multimodaux. La plus grande multimodalité de ces trois types de ménages (TyMe) pourrait être liée à l'absence de contraintes (familles sans enfants et/ou travail). Ces résultats font écho à ceux de la littérature. Par ailleurs, le type de voisinage (TyVo) étant le premier prédicteur de la multimodalité, l'impact de l'offre de transport sur les comportements de déplacement multimodaux est approfondi dans la section suivante.

2.4.4.3 Évolution de la multimodalité de 2013 à 2018 : Effet de l'offre de transport

En comparant les mêmes types de personnes (TyPe) en 2013 et 2018, il est possible de constater que, dans l'ensemble, la multimodalité des comportements de mobilité a augmenté. La valeur de l'indicateur a diminué (et donc la diversité d'utilisation des modes a augmenté) pour 205 des 311 combinaisons. Plus précisément, la valeur moyenne de l'indicateur de multimodalité est passée de 0,38 par type (TyPe) en 2013 à 0,36 en 2018, soit une réduction moyenne de 0,02. Cette différence entre les deux années est significative à 10 % selon le test de Student. De plus, cette évolution de la multimodalité par type (TyPe) peut être croisée avec l'évolution des variables d'offre agrégées (somme de toutes les unités d'offre de transport à proximité des individus appartenant à chaque type) : les corrélations obtenues sont négatives. Cela signifie qu'une augmentation de l'offre de transport sur la période de 5 ans a eu tendance à entraîner une diminution de la valeur de l'indicateur, donc une augmentation de la multimodalité.

La méthode des doubles différences permet d'affiner cette relation. Tel qu'expliqué dans la section 2.4.3.3, l'impact causal de trois variables d'offre de transport alternative est étudié : le nombre de passages-arrêts en transport en commun cumulés sur 24 heures, le nombre de points d'ancrage dans les stations de vélopartage et le nombre de véhicules dans les stations d'autopartage à proximité. Plus précisément, il s'agit d'examiner si l'offre de ces services a été bonifiée sur la période de 5 ans étudiée, puis de modéliser l'effet de cette amélioration sur l'indicateur de multimodalité choisi par type (TyPe). Cet impact est pondéré par le nombre d'unités d'offre de transport qui ont été ajoutées entre 2013 et 2018. De plus, les quatre variables catégorielles qui caractérisent les types de personnes (TyPe) sont incluses dans le modèle comme variables de contrôle (la catégorie ayant le plus grand nombre d'observations étant la catégorie de référence). Les trois modèles de régression qui en résultent sont détaillés dans le Tableau 2-8. Ces modèles sont plutôt bons : ils expliquent environ 50% de la variabilité de l'indicateur de multimodalité. Le nombre de types (TyPe) dans les groupes traité et témoin est également indiqué en bas du tableau.

Tableau 2-8 Résultats du modèle des doubles différences avec un traitement basé sur l'évolution de l'offre de transport entre 2013 et 2018

	Passages-arrêts TC (24h)	# ancrages vélopartage	# véhicules autopartage
(Ordonnée à l'origine)	4.00E-01 ***	4.26E-01 ***	4.15E-01 ***
Année = 2018	-1.14E-02	-9.31E-03	-1.33E-02 .
Groupe = amélioration de l'offre	9.02E-03	-2.68E-02 **	-1.13E-02
Type de voisinage (TyVo) = 1	-2.15E-02	-1.28E-02	-2.34E-02 .
Type de voisinage (TyVo) = 2	-5.85E-02 ***	-5.77E-02 ***	-6.45E-02 ***
Type de voisinage (TyVo) = 3	-8.26E-02 ***	-8.15E-02 ***	-9.04E-02 ***
Type de voisinage (TyVo) = 4	-2.82E-02 .	-4.53E-02 ***	-3.40E-02 **
Type de voisinage (TyVo) = 6	1.22E-01 ***	1.15E-01 ***	1.15E-01 ***
Type de ménage (TyMe) = 1	3.77E-02 **	3.61E-02 **	3.63E-02 **
Type de ménage (TyMe) = 2	-3.32E-02 *	-3.43E-02 **	-3.56E-02 **
Type de ménage (TyMe) = 3	-5.07E-02 ***	-4.40E-02 ***	-5.01E-02 ***
Type de ménage (TyMe) = 5	4.79E-02 **	4.24E-02 **	4.24E-02 **
Type de ménage (TyMe) = 6	-1.61E-02	-5.57E-03	-1.06E-02
Type de ménage (TyMe) = 7	-4.97E-02 **	-4.67E-02 **	-5.50E-02 ***
Type de ménage (TyMe) = 8	1.81E-02	2.05E-02	1.36E-02
Groupe d'âges = [0;15[1.92E-02	2.04E-02	2.11E-02
Groupe d'âges = [15;25[-1.01E-01 ***	-1.07E-01 ***	-1.02E-01 ***
Groupe d'âges = [25;40[4.77E-03	-2.09E-03	4.15E-03
Groupe d'âges = 65 ans et plus	2.63E-02 *	2.62E-02 *	2.91E-02 *
Genre = Homme	9.41E-03	9.00E-03	8.65E-03
Effet de l'amélioration de l'offre = Année x Groupe x ΔOffre	-2.85E-07 **	-2.91E-06 ***	-4.29E-05 **
R^2 ajusté	0.502	0.511	0.501
Groupe traité : # de types (TyPe)	123	216	152
Groupe témoin : # de types (TyPe)	188	95	159

Significativité: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Les résultats obtenus précédemment avec les arbres de régression sont confirmés par ces modèles. Les jeunes qui ont entre 15 et 24 ans ont tendance à avoir une utilisation plus variée des modes que les personnes âgées de 40 à 64 ans (catégorie de référence), alors que les personnes de 65 ans et plus sont à l'inverse plus unimodales. Comparativement aux familles traditionnelles, les comportements de déplacement des très jeunes/jeunes familles et des cinquantenaires sont plus diversifiés, tandis que les familles multigénérationnelles ainsi que les familles composées d'adultes et de personnes âgées présentent des niveaux de multimodalité moins élevés. Les résidents de tous les types de voisinages (TyVo) à l'exception du type 6 sont plus multimodaux que ceux du type 5. Cependant, le genre ne semble pas avoir un effet significatif sur la diversité d'utilisation des modes.

Le résultat central de cette recherche reste néanmoins l'effet de l'amélioration de l'offre de transport (en bleu dans le tableau). Cet impact est significatif pour les trois modes de transport étudiés. Les coefficients estimés peuvent être interprétés comme suit : l'ajout de 10 000 passages-arrêts de transport en commun agrégés dans un rayon de 500 mètres autour des habitants d'un même type (TyPe) est associé à une réduction de $-2,85e-03$ de l'indicateur de multimodalité, ce qui équivaut à environ 20 % de la diminution moyenne observée entre 2013 et 2018. De même, l'ajout de 1 000 points d'ancrage pour le vélopartage (respectivement 100 véhicules d'autopartage) pourrait expliquer la réduction d'environ 20 % (respectivement 25 %) de la baisse moyenne observée entre 2013 et 2018. Comme ces résultats se réfèrent à des valeurs agrégées, les nombres d'unités d'offre de transport à ajouter n'ont pas vraiment de sens, mais la direction des impacts observés est souhaitable : la bonification de l'offre de transport a conduit à une diminution significative de l'indicateur, donc à une augmentation significative de la multimodalité. De plus, l'autopartage est le mode qui a l'effet positif le plus important sur les comportements de déplacement multimodaux.

2.4.5 Conclusion

Basée sur deux enquêtes régionales transversales (2013 et 2018) de Montréal, la démarche méthodologique proposée a permis d'étudier la multimodalité à partir de carnets de déplacements quotidiens en rassemblant les individus dans des groupes typiques de personnes (TyPe) et en sommant leurs intensités d'utilisation de plusieurs modes sur l'ensemble des jours enquêtés. De plus, il a été possible d'évaluer les changements dans les comportements de déplacement multimodaux et de faire de l'inférence causale sans données de panel en comparant les mêmes types (TyPe) observés à 5 ans d'intervalle. Cette typologie de personnes a été construite à partir de quatre attributs : le type de voisinage TyVo (défini par des variables décrivant l'utilisation du sol et l'offre de transport disponible dans un rayon de 500 mètres autour du lieu de résidence), le type de ménage TyMe (défini par la composition du ménage), le groupe d'âges et le genre. Cette méthode de segmentation empirique a conduit à l'analyse de 311 combinaisons (ou types de personnes). La multimodalité a ensuite été mesurée grâce à une variante de l'indice de Dalton appliquée à une série d'intensités d'utilisation agrégées (pondérées) par type de personnes (TyPe). Cet indicateur a été paramétré pour mieux prendre en compte les modes les moins utilisés, c'est-à-dire les modes autres que la voiture. La sensibilité de l'indicateur a également été analysée afin de déterminer la meilleure unité de mesure de l'intensité d'utilisation des modes : la durée de trajet a été sélectionnée. En outre, plusieurs niveaux d'agrégation (ou d'indépendance) des modes ont été testés : les modes de transport en commun ont finalement été distingués. Les niveaux de multimodalité ont ensuite été corrélés avec les attributs socio-démographiques et spatiaux des types de personnes (TyPe) par le biais d'arbres de régression. Enfin, la diminution de l'indicateur de variabilité modale par TyPe entre 2013 et 2018 a été expliquée par l'évolution de trois services de mobilité alternatifs (le transport en commun, le vélopartage et l'autopartage basé stations) sur la période de 5 ans. Plus précisément, une approche par doubles différences a été mise en œuvre pour estimer l'impact causal d'une bonification de l'offre de transport (agrégée dans le voisinage des lieux de résidence par TyPe) sur la multimodalité.

Par conséquent, dans un contexte où l'analyse de la multimodalité est un sujet d'importance croissante, ce travail fournit des outils pour aider les planificateurs des transports à favoriser des comportements de mobilité plus variés. En effet, des indicateurs mesurant la diversité d'utilisation des modes pourraient être calculés pour fixer des objectifs en matière de mobilité multimodale dans les stratégies de planification, puis pour évaluer dans quelle mesure les

interventions mises en place ont permis d'atteindre ces objectifs. L'identification des prédicteurs de la multimodalité est également utile pour cibler les voyageurs qui utilisent une plus grande variété de modes ; ceux-ci seraient plus ouverts aux nouveaux services de mobilité selon la littérature sur les « styles de modalité ». Sur ce sujet, les résultats de cette recherche sont cohérents avec les travaux recensés dans la littérature : les personnes les plus multimodales sont principalement des jeunes, ou des personnes ayant moins de contraintes, comme les ménages sans enfants ou les personnes âgées encore autonomes. Cependant, la variable la plus importante est l'accessibilité aux services de transport : les niveaux de multimodalité les plus élevés sont observés dans des zones bien desservies. Par ailleurs, l'inférence causale est une approche particulièrement intéressante pour les planificateurs afin d'isoler l'effet d'une stratégie (implantation d'un nouveau service ou bonification d'un service) sur les comportements de déplacement. Les méthodes associées pourraient permettre de déterminer l'emplacement et/ou la quantité d'unités d'offre à ajouter pour atteindre les objectifs visés. D'après le modèle développé, l'ajout de 1000 passages-arrêts de transport en commun (respectivement points d'ancrage de vélopartage et véhicules d'autopartage) entraîne une diminution significative de $2,85E-04$ (respectivement $2,91E-03$ et $4,29E-02$) de l'indicateur choisi, donc une augmentation de la multimodalité. Ces résultats devraient être interprétés à la lumière d'objectifs fixés en amont. Ainsi, cette recherche pourrait contribuer à guider les décideurs politiques, les parties prenantes et les partenaires de planification dans leurs futures décisions d'investissement.

Néanmoins, ce travail présente certaines limites. Tout d'abord, la marche, lorsqu'elle est combinée à d'autres modes, est négligée dans le calcul des intensités d'utilisation. La durée et la distance des segments de déplacement à pied pourraient être estimées pour les trajets en transport en commun à l'aide du calculateur Transition, mais les informations sur le premier et le dernier kilomètre dans les enquêtes exploitées ne sont pas suffisantes pour les autres modes. En outre, la méthode proposée dépend de multiples paramètres et d'autres analyses de sensibilité devraient être effectuées, notamment pour valider le rayon de 500 mètres qui délimite le voisinage de chaque ménage. De surcroît, l'hypothèse sous-jacente de la méthode des doubles différences n'est pas totalement vraie : la composition des groupes traité et témoin n'est pas nécessairement constante dans le temps, et certains événements pourraient avoir des impacts différents sur les deux groupes, qui suivraient donc des tendances différentes. Toutefois, cette limite méthodologique pourrait être compensée par l'application d'un modèle plus évolué basé sur le score de propension (Stuart et al., 2014). Des travaux futurs se concentreront sur le dépassement des limites mentionnées. De plus, des seuils de niveau de service pourraient être développés (plutôt que de modéliser un effet continu des variables d'offre). Une enquête sur plusieurs jours (au moins une semaine) est également envisagée pour étudier la multimodalité au niveau individuel sans avoir à créer une typologie de personnes. À l'inverse, un modèle d'inférence causale pourrait être développé à un niveau encore plus agrégé (systémique), par zone spatiale plutôt que par type Type, en utilisant des données passives.

2.5 Méthode de synthétisation spatialisée de la population et de sa mobilité

- Par : Mohamed Khachman, doctorat
- Supervision : Pre Catherine Morency / Pr Francesco Ciari
- Contexte : Chaire Mobilité

2.5.1 Introduction

Les microsimulations couplées aux modèles basés activités deviennent une pratique de plus en plus fréquente dans le domaine de la modélisation et de la prévision de la demande en transport aux dépens des approches classiques, basées sur le modèle à quatre étapes, en raison des nombreuses limitations de ces dernières. Ces modèles tels que MATSim (Balmer et al., 2009), DynaMIT (Ben-Akiva et al., 2010), UrbanSim (Waddell, 2002) et ILUTE (Salvini & Miller, 2005) entre autres, exigent comme données entrantes des données désagrégées décrivant l'ensemble de la population de personnes et/ou de ménages, ainsi que son activité en termes de mobilité. Or, le processus de récolte de données de ce type s'avère coûteux, chronophage et présente une certaine complexité (Mohammadian et al., 2010). Face à cela, il s'avéra nécessaire de créer les données désagrégées requises pour alimenter les expériences de microsimulation par un processus que l'on appelle la synthèse de population.

La synthèse de population est typiquement un processus se servant de données agrégées, provenant des résumés de recensements, et de données partielles désagrégées relatives à un échantillon d'enquête, provenant souvent de fichiers de micro-données à grande diffusion (FMGD), pour produire une population totalement énumérée d'individus et/ou de ménages avec des caractéristiques sociodémographiques assignées. Le but est de produire une population synthétique ayant des caractéristiques statistiquement cohérentes avec les données disponibles décrivant la population réelle.

Avant de se lancer dans le processus de synthèse, un système de zonage est défini en découpant la région en zones souvent prédéfinies dans le cadre du recensement. Par exemple, les régions métropolitaines, les secteurs de recensement ou les aires de diffusion peuvent être utilisés. Ensuite, les caractéristiques sociodémographiques selon lesquelles la population synthétique sera générée et qui serviront donc de variables de contrôle pour le processus de synthèse, sont choisies. Souvent les caractéristiques ayant une influence prépondérante dans la détermination des comportements de mobilité des individus sont sélectionnées.

Ainsi, les données entrantes peuvent être préparées. Les données agrégées correspondant aux zonages et aux variables de contrôle choisies sont extraites des résumés du recensement. Il s'agit de tableaux à une, deux ou n dimensions contenant les totaux de la distribution conjointe des variables de contrôle sélectionnées que ce soit au niveau des individus ou des ménages. Quant aux données désagrégées, elles sont tirées à partir d'un échantillon désagrégé et anonymisé de personnes et/ou de ménages complètement caractérisés dans le cadre d'une enquête. Les données de l'échantillon sont alors filtrées pour garder uniquement celles relatives aux variables de contrôle sélectionnées, puis tabulées pour être utilisées dans la synthèse de population. Les échantillons utilisés, généralement inférieurs à 5% de la population, ne sont pas géolocalisés.

Cependant, au Québec, les données enregistrées dans le cadre des enquêtes Origine-Destination (O-D) cycliquement réalisées, peuvent être utilisées comme intrants désagrégés pour la synthèse de population. Malgré le nombre limité de variables communes entre l'échantillon O-D et les totaux du recensement, l'échantillon O-D présente plusieurs avantages qui le distinguent des fichiers de microdonnées à grande diffusion (FGMD) et qui le rendent particulièrement intéressant

pour un exercice de synthèse de population en général, et pour la spatialisation de la population synthétique en particulier :

- Sa taille importante : l'échantillon disponible constitue environ 4% de la population ;
- Sa désagrégation spatiale : chaque ménage enquêté dispose de coordonnées (latitude, longitude) permettant de précisément le localiser ;
- Ses ménages sont typifiés : une typologie de ménages transférable dans le temps et a été établie à partir des enquêtes O-D de 1998 à 2013 réalisées dans la région métropolitaine de Montréal (Fabre, 2018).

La synthèse de population peut être résumée à un problème d'optimisation où l'on cherche à ajuster l'échantillon utilisé aux totaux des tableaux résumés du recensement tout en préservant la corrélation existante, dans l'échantillon, entre les variables de contrôle sélectionnées.

L'agrégation du système de zonage utilisé pour la synthèse de population varie de celle d'une région métropolitaine à celle d'un îlot de diffusion. Or, pour simuler la variabilité spatio-temporelle des comportements de mobilité de la population réelle, une spatialisation ponctuelle i.e. à l'échelle du bâtiment, voire de l'unité de logement, serait requise. Ainsi, le processus de synthèse spatialisée de la population qui fait l'objet de ce projet de recherche comporte deux volets principaux : d'une part la génération de la population synthétique et d'autre part la spatialisation de celle-ci.

2.5.2 Revue de littérature

La littérature consultée peut être séparée en trois thématiques : les méthodes de synthèse de population, la typologie de ménages et les méthodes de spatialisation.

2.5.2.1 Méthodes de synthèse de population

Plusieurs approches de synthèse de population basées sur différents principes sont documentées dans la littérature. Les méthodes de synthèse de population peuvent être séparées en trois grandes familles : les méthodes de synthèse par ajustement, l'optimisation combinatoire et les méthodes de synthèse par simulation ou méthodes probabilistes.

Méthodes de synthèse de population par ajustement

Les méthodes de synthèse par ajustement ont comme objectif principal d'ajuster les totaux des variables de contrôle dans l'échantillon à celles observées dans les résumés du recensement. Dans ce qui suit, un aperçu des méthodes de synthèse par ajustement est donné.

Ajustement proportionnel itératif (IPF)

L'IPF – aussi appelé approche conventionnelle (Guo & Bhat, 2007) – a d'abord été utilisé dans la modélisation des systèmes de transport pour synthétiser des populations de ménages (Beckman et al., 1996). L'approche standard de synthèse de population basée sur l'IPF comporte deux étapes : l'estimation et la sélection (Templ et al., 2017). Dans l'étape d'estimation, la distribution conjointe des variables de contrôle est estimée par ajustement itératif des fréquences des différentes caractéristiques de l'échantillon sur leurs totaux respectifs extraits du recensement. Les fréquences des combinaisons de caractéristiques de l'échantillon sont inscrites dans les cases de la matrice et leurs totaux respectifs constituent les marges d'ajustement.

Une fois l'effectif connu dans la population synthétique pour chaque combinaison de caractéristiques, l'étape de sélection commence. Pour chacune des cases ajustées – correspondant à une combinaison de caractéristiques – chacun des ménages de l'échantillon se

voit attribuer une probabilité de sélection proportionnelle à la similarité existante entre ses caractéristiques et celles de la case. Selon les probabilités calculées, des ménages sont sélectionnés de l'échantillon jusqu'à atteindre les effectifs des cellules ajustées et une population synthétique de ménages est par conséquent obtenue. Les membres assignés à ces ménages dans l'échantillon forment une population synthétique d'individus mais celle-ci ne respecte pas les totaux du recensement pour les individus puisque l'ajustement a été effectué uniquement au niveau des ménages. L'étape de sélection peut être opérée suivant une fonction traduisant le degré de divergence ou de convergence entre les combinaisons cibles et celles de l'échantillon (Beckman et al., 1996) ou aléatoirement par une série de simulations de Monte Carlo. Des populations synthétiques multiples peuvent ainsi être produites respectant toutes les contraintes imposées.

Mise à jour proportionnelle itérative (IPU)

Dans PopGen, Ye et al. (2009) implémentent un algorithme heuristique de synthèse de population permettant de surmonter quelques limitations de l'IPF. Alors que l'IPF se contente d'ajuster la distribution à un seul niveau uniquement, souvent celui des ménages, l'IPU ajuste les distributions des ménages et des individus simultanément en recalculant les facteurs de pondération attribués aux ménages selon leur composition en individus. Ainsi, une fois l'ajustement selon les contraintes des ménages terminé, les poids sont ajustés selon les types de personnes de manière que seuls les facteurs de pondération des ménages comportant des individus d'un certain type soient modifiés lorsque l'ajustement se fait pour ce type.

À chaque itération, un indicateur de la qualité d'ajustement δ , consistant en la différence en valeur absolue entre la somme pondérée et la contrainte, est calculé pour chacune des catégories. La valeur de δ ne décroît pas constamment au cours des itérations. Ainsi, à chaque itération, les poids correspondant à la valeur minimale de δ sont conservés. La différence en valeur absolue entre les valeurs de l'indicateur δ avant le début de l'itération (δ_a) et après la fin de celle-ci (δ_b), $\Delta = |\delta_b - \delta_a|$, indique le gain en termes de qualité d'ajustement pour chacune des itérations. L'algorithme converge lorsque la valeur de Δ est en-dessous d'un seuil ϵ prédéfini donc lorsque le gain ou la variation des poids calculés par rapport au poids minimal retenu demeure minime.

Lors de la sélection, la probabilité d'un ménage d'être choisi vaut son poids divisé par la somme des poids des ménages du même type. Le nombre ainsi obtenu présente le nombre de ménages du même type avec une composition identique d'individus.

Fournier et al. (2020) introduisent un algorithme résolvant le problème de synthétisation de la population au niveau des ménages et des individus simultanément sous forme d'optimisation matricielle. En plus, ils intègrent l'assignation de l'emplacement de travail à la synthèse de population en transformant ce dernier en attribut de la population synthétique.

Optimisation de l'entropie

Une approche similaire à l'IPU est développée par Bar-Gera et al. (2009) et consiste à sélectionner la solution présentant une entropie optimale sous la contrainte du respect des distributions marginales au niveau des individus et des ménages simultanément. La différence essentielle entre cette approche et l'IPU réside dans le fait que l'IPU modifie de la même façon les poids des ménages comportant un certain type d'individus lors de l'ajustement de ce type alors que la méthode proposée répond de façon plus importante les ménages comportant plus de personnes de ce type (Müller, & Axhausen, 2012). Le but est de minimiser l'apport en termes de nouvelles informations et par conséquent de garder une distribution de poids la plus proche

possible de la distribution initiale tout au long du processus d'ajustement aux conditions marginales disponibles.

IPF hiérarchique

L'IPF hiérarchique (Müller & Axhausen, 2011) consiste en un ajustement de manière alternative entre le niveau des ménages et celui des individus. Ainsi, pour chaque itération, un ajustement est effectué au niveau des ménages puis les facteurs de pondération calculés pour chacun des ménages sont attribués aux individus qui y appartiennent. Ensuite, un ajustement est effectué au niveau des individus en utilisant les contraintes marginales des attributs relatifs aux individus et la moyenne des facteurs de pondération attribués aux individus d'un certain ménage est utilisée comme facteur de pondération du ménage pour commencer une deuxième itération d'ajustement au niveau des ménages et ainsi de suite.

PopH

PopH est une méthode heuristique de synthèse de population proposée par Zhuge et al. (2017) dans le but de surmonter le problème d'absence de garantie d'optimalité de la solution fournie par IPF. Comme expliqué précédemment, l'IPF est capable de générer de nombreuses populations synthétiques différentes satisfaisant toutes les contraintes imposées. Ainsi, le choix de la population la plus conforme à la réalité demeure non guidé. De plus, l'approche proposée ne se limite pas à minimiser la moyenne des différences entre les totaux générés et les contraintes marginales imposées; elle considère aussi les écarts-types de ces différences dans le processus d'optimisation. L'algorithme de PopH permet donc de prendre en considération les deux précédentes limitations en se basant initialement sur une matrice observée de ménages et en ajustant cette distribution initiale à chaque itération tout en minimisant l'erreur moyenne et l'écart-type des variables de contrôle.

Mise à jour proportionnelle itérative renforcée (enhanced IPU)

Konduri et al. (2016) ont développé un IPU renforcé (enhanced IPU) qui considère les contraintes au niveau des individus et des ménages à plusieurs échelles géographiques simultanément démontrant une amélioration de la qualité de la population synthétique par rapport à l'IPU de base. Pour l'IPU amélioré, deux échelles géographiques sont considérées : « region » correspond à la zone géographique la plus grande et « geo » à la zone la plus petite incluse dans la zone « region ». La pondération est basée sur un processus identique à celui de la version basique de l'IPU : un poids unitaire est accordé aux ménages de l'échantillon puis les attributs régionaux des ménages, les attributs locaux des ménages, les attributs régionaux des individus et les attributs locaux des individus sont respectivement ajustés de la même façon que pour la première version de l'IPU. Pour chaque combinaison agent*échelle géographique, quand un type de ménages est considéré pour ajustement, seulement les poids des ménages du même type au même niveau de zonage sont ajustés. Lorsqu'il s'agit d'un type d'individus, seulement les poids des ménages incluant des personnes de ce type au même niveau de zonage sont ajustés. L'algorithme IPU renforcé est implémenté dans la nouvelle version PopGen 2.0.

Une nouvelle version de l'IPU permettant de considérer simultanément trois niveaux de zonage a été élaborée par Moreno et Moeckel (2018). L'algorithme a permis de synthétiser 4,5 millions de personnes et 2,1 millions de ménages en moins d'une heure et demie (Moreno & Moeckel, 2018).

Optimisation combinatoire (CO)

Williamson et al. (1998) proposent l'optimisation combinatoire comme alternative à l'ajustement proportionnel itératif. La méthode n'utilise pas de tableaux de contingence mais est opérée en sélectionnant aléatoirement et itérativement – zone par zone - un ménage dans l'échantillon afin de l'insérer dans la population synthétique. Un indicateur permettant d'évaluer la qualité de la population synthétisée est défini et calculé à chaque itération afin de vérifier que l'itération contribue positivement à la conformité de la population synthétique aux critères d'ajustement. Sinon, l'itération n'est pas considérée et une autre itération sélectionnant un autre ménage de l'échantillon est lancée à partir de l'état précédent de la population synthétique. Lorsque l'indicateur de divergence entre la population synthétique et les données agrégées décrivant la population réelle prend une valeur inférieure ou égale au seuil préfixé, la convergence est atteinte.

L'optimisation combinatoire peut être opérée selon une variété de procédures : méthode de descente (hill climbing), recuit simulé (simulated annealing) ou en utilisant un algorithme génétique (Williamson et al., 1998). Le recuit simulé, bien que chronophage (Farooq et al., 2013), a été souvent utilisé (Openshaw & Rao, 1995 ; Williamson et al., 1998 ; Voas & Williamson, 2000) et s'est avéré efficace pour éviter d'être piégé par un minimum local (Abraham et al., 2012). Le produit de la CO consiste en une liste ajustée d'agents à poids entiers unitaires directement générée à partir des données entrantes.

Méthodes de synthèse de population par simulation

Les méthodes probabilistes visent à synthétiser une population en échantillonnant à partir d'une estimation de la distribution conjointe des variables contrôlées.

Monte-Carlo par chaîne de Markov (MCMC)

Compte tenu de la vulnérabilité des approches basées sur l'ajustement vis-à-vis de la disponibilité et de la qualité des données entrantes, Farooq et al. (2013) proposent une approche de différente nature : il s'agit d'une méthode basée sur la simulation (simulation-based approach). L'idée est de synthétiser des agents à partir de la distribution conjointe des variables de contrôle dans la population réelle. Les variables de contrôle constituent désormais des variables aléatoires dont on cherche la distribution conjointe dans la population réelle. Or, les données détaillées du recensement étant indisponibles et les données disponibles étant sujettes à maintes approches d'anonymisation, la construction de la distribution conjointe des attributs sociodémographiques dans la population réelle s'avère impossible. Pour cela l'approche proposée par Farooq et al. (2013) consiste à établir une estimation de la distribution conjointe des variables de contrôle à partir de différentes sources de données agrégées et désagrégées disponibles. En d'autres mots, on cherche à établir les probabilités conditionnelles complètes de chacune des catégories des variables en fonction des catégories des autres variables considérées.

« Un échantillonneur de Gibbs est une méthode Markov Chain Monte Carlo (MCMC) qui utilise les probabilités conditionnelles pour simuler des réalisations de la distribution conjointe » [Notre traduction] (Farooq et al., 2013). Ainsi, un échantillonneur de Gibbs est utilisé pour générer une population synthétique basée sur une estimation de la distribution conjointe, elle, établie à partir de toutes les données sociodémographiques disponibles. Des probabilités conditionnelles sont alors calculées à partir des données disponibles (échantillon, résumés de ce recensement, enquêtes...). Comme les données détaillées du recensement ne sont pas disponibles, des modèles paramétriques de choix discret et/ou continu sont souvent utilisés pour construire des distributions conditionnelles à partir des échantillons. Lorsque les distributions conditionnelles

demeurent quand même incomplètes, des hypothèses sont émises : on peut par exemple considérer l'indépendance d'une variable par rapport à une autre ou établir des liens logiques comme une probabilité nulle d'avoir un diplôme universitaire sachant que l'on a deux ans par exemple. Une fois les distributions conditionnelles prêtes, l'échantillonneur de Gibbs est démarré et une infinité de populations synthétiques à caractéristiques statistiques similaires peut être générée. Toutefois, les agents peuvent différer d'une population synthétique à une autre (Farooq et al., 2013).

MCMC hiérarchique

Casati et al. (2015) introduisent une amélioration de l'approche décrite dans la section précédente en y rajoutant deux éléments : d'une part, les agents sont typifiés - selon une hiérarchie qui structure le ménage - et les distributions conditionnelles des types les plus bas dans la hiérarchie incluent les attributs des types plus élevés. Une population synthétique d'individus hiérarchisés, et par conséquent regroupés en ménages, est alors obtenue. D'autre part, les auteurs ajoutent une étape d'ajustement de la population synthétique, obtenue par simulation, de manière à perfectionner le respect des contraintes agrégées, ou des totaux marginaux, disponibles.

Dans l'exemple traité par Casati et al. (2015), 3 types ont été utilisés : propriétaires, types intermédiaires (femme, enfant) et autres. Le choix des propriétaires se fait sur une base logique de revenu ou d'âge dans un ménage de l'échantillon par exemple et ceux-ci héritent d'un attribut indiquant le nombre de personnes dans leurs ménages respectifs (NUMPAX). Ils sont alors simulés selon l'approche MCMC basique détaillée précédemment. Ensuite, les agents des types intermédiaires sont simulés selon une distribution conditionnelle considérant les catégories auxquelles ils appartiennent pour différentes variables de contrôle, mais aussi les attributs des propriétaires des ménages auxquels ils seront assignés. Enfin, les autres agents sont simulés pour compléter les ménages.

Réseau bayésien

Dans le même esprit probabiliste, Sun et Erath (2015) proposent d'utiliser un réseau bayésien pour établir une estimation de la distribution conjointe des variables de contrôle dans la population réelle. « *Un réseau bayésien code les relations probabilistes (causalité ou dépendance) entre un ensemble de variables à l'aide d'un modèle graphique* » [Notre traduction] (Sun & Erath, 2015). Un réseau bayésien comporte des nœuds, représentant les variables d'intérêt, liés selon les interactions à modéliser. L'origine d'un lien représente la variable « parent » et son extrémité la variable « enfant ». Pour chacun des nœuds, une distribution de probabilités est calculée pour la variable considérée conditionnée par les différentes catégories de ses variables « parents ». Tel que décrit, le réseau comporte deux aspects importants : sa structure définissant les interactions entre les variables considérées et les calculs des distributions conditionnelles de chacune des variables. La combinaison de ces deux éléments rend possible le calcul de la distribution conjointe des variables incluses dans le modèle.

La distribution conditionnelle d'un certain nœud du réseau bayésien est déterminée à partir de la couverture de Markov de ce nœud : il s'agit de ses parents, ses enfants et les co-parents de ses enfants. Ainsi, on ne peut pas limiter la définition de la distribution conditionnelle aux parents du nœud considéré ce qui soulève une autre limitation des hypothèses simplificatrices faites dans le cadre des méthodes MCMC (Sun & Erath, 2015).

Selon les auteurs, le réseau Bayésien est capable d'appréhender la structure de corrélation de la population à partir d'échantillons de données limitées et par suite, de produire une estimation

fiable de la distribution conjointe des variables considérées. L'utilisation du réseau bayésien pour modéliser la structure sous-jacente d'interaction entre les variables évite alors à l'utilisateur le défi de définition des distributions conditionnelles des variables de contrôle ainsi que le piège d'un éventuel surajustement aux propriétés de l'échantillon utilisé (Sun & Erath, 2015).

Le réseau bayésien est alors entraîné en utilisant les données disponibles pour définir la structure et les distributions de probabilités reproduisant de manière optimale la distribution conjointe des variables considérées. Ainsi, un critère permettant de définir la performance des différentes structures du réseau est utilisé et un algorithme de recherche heuristique est lancé pour localiser l'optimum du critère et par conséquent conserver la meilleure configuration du réseau bayésien selon les données fournies. Il en découle que le réseau bayésien utilisé est fortement dépendant de la qualité et de la quantité des données d'entraînement (Sun & Erath, 2015).

Le réseau bayésien peut être appliqué de manière hiérarchique tel qu'introduit par Sun et al. (2018) afin d'optimiser simultanément la qualité de la population au niveau des ménages et des individus. Enfin, Saadi et al. (2016) ont proposé l'utilisation d'un modèle de Markov caché.

Modèle de Markov Caché (MMC)

Saadi et al. (2016) proposent l'utilisation d'un modèle de Markov caché dans l'exercice de synthèse de population. Cette méthode permet de synthétiser une population de qualité avec un échantillon désagrégé et une seule distribution marginale (Saadi et al., 2016). Elle permet aussi l'intégration de multiples sources de données i.e. plusieurs échantillons pour la synthèse de population.

Méthodes par apprentissage profond

Récemment, des méthodes relevant de l'apprentissage génératif profond ont été adaptées à l'exercice de synthèse de population. Ces méthodes mettent à profit les réseaux de neurones afin de gérer des distributions à un nombre élevé de dimensions (Garrido et al., 2019). Borysov et al. (2019) utilisent un auto-encodeur variationnel (Variational Auto-Encoder) pour synthétiser une population avec un nombre élevé de caractéristiques. L'augmentation du nombre de variables considérées s'accompagne naturellement par une augmentation des combinaisons de caractéristiques existantes dans la population réelle mais absente dans les échantillons disponibles. Garrido et al. (2020) utilisent l'auto-encodeur variationnel et le réseau antagoniste génératif de Wasserstein (Wasserstein Generative Adversarial Network) pour remédier à ce problème. Johnsen et al. (2020) comparent la performance de l'auto-encodeur variationnel conditionnel (Conditional Variational Auto-Encoder) à celle du réseau antagoniste génératif conditionnel (Conditional Generative Adversarial Network) montrant que le premier s'avère meilleur dans l'estimation de la distribution conjointe.

2.5.2.2 Typologie de ménages

Dans son mémoire, Fabre (2018) effectue une revue de la littérature portant sur l'importance des attributs du ménage dans la détermination des comportements de mobilité ainsi que sur les tentatives d'établissement d'une typologie de ménages dans un contexte de modélisation ou de prévision de la demande de transport. Ainsi, à la suite de l'analyse d'un ensemble de variables sur les enquêtes O-D 1998, 2003, 2008 et 2013 – plusieurs années d'enquête sont considérées dans un souci de transférabilité temporelle – ses travaux de recherche aboutissent, entre autres, à l'élaboration d'une typologie composée de huit catégories de ménages définies dans le Tableau 2-9 ci-dessous.

Tableau 2-9 : Caractéristiques des huit catégories de la typologie de ménages (Fabre, 2018)

Types de ménages	Jeunes couples, colocs ou célibataires	Cinquantenaires	Retraités	Adultes et personnes âgées	Familles traditionnelles	Très jeunes familles	Jeunes familles	Familles multigénérationnelles
Taille	69251	102273	82364	26915	117727	129566	97992	20163
Variance à l'intérieur des groupes	3545938,0	4624632,0	4752147,0	2966272,0	5322576,0	4358357,0	3342749,0	2952850,0
Variance inter/variance totale	0,919							
Nombre de personnes	1,9	1,8	1,7	2,8	3,4	4,0	4,4	4,6
Âge moyen	30,8	54,8	72,6	57,5	36,9	21,6	26,3	40,1
Amplitude max des âges	2,7	2,9	2,6	31,7	32,3	30,1	38,8	58,4
Nombre de moins de 12 ans	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4	1,2	0,7
Nombre de 76-84 ans	0,0	0,0	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,2

2.5.2.3 Méthodes de spatialisation

La spatialisation de la population synthétique peut être intégrée au processus de synthèse ou être traitée comme une tâche complémentaire à celle de la génération de la population synthétique. Les méthodes de spatialisation ont pour objectif, comme l'indique leur nom, de spatialiser une population d'agents synthétiques à une résolution géographique plus ou moins précise. Ultiment, les agents synthétiques se verront assigner une localisation ponctuelle souvent définie par un couple de coordonnées (x,y) ou (latitude, longitude).

Spatialisation intégrée à la synthèse de population

Plusieurs outils de synthèse spatialisée de population ont été introduits. simSALUD (Kosar et Tomintz, 2014) utilise des intrants spatiaux et non spatiaux disponibles à une échelle grossière pour synthétiser des données à une échelle plus fine. Il est utilisé pour estimer les données relatives aux fumeurs au niveau municipal en Autriche où les données relevant du domaine de la santé sont disponibles au niveau fédéral uniquement. Synthetic Populations and Ecosystems of the World (SPEW) (Gallagher et al., 2018) est un autre outil de synthèse spatialisée de population permettant de distribuer les ménages synthétiques soit de manière uniforme dans une zone soit tout au long des routes. Chapuis et al. (2018) ont développé Gen* : il s'agit d'un outil intégrant des données sociodémographiques et des données auxiliaires pour synthétiser une population spatialisée. Différentes fonctions de distribution y sont intégrées pour permettre une spatialisation des ménages au niveau du bâtiment si besoin est. Une autre approche de spatialisation utilisant une estimée de la distribution marginale des attributs des ménages au niveau des bâtiments est introduite dans le cadre du projet SimMobility (Zhu et Ferreira, 2014).

Spatialisation post-synthèse

Il existe différentes approches qui permettraient de spatialiser la population synthétique a posteriori. Ces approches permettraient dans un premier temps d'estimer le type de ménage qui le plus probablement occuperait une unité de logement. Ainsi, les ménages d'un certain type à l'intérieur d'une zone définie seraient aléatoirement distribués sur les unités de logement correspondantes.

L'une de ces approches est la régression géographiquement pondérée. Comme l'expliquent Wheeler et Páez dans l'ouvrage intitulé « Handbook of Applied Spatial Analysis. Software Tools, Methods and Applications » publié en 2010 (Wheeler & Páez, 2010), les modèles de régression généralement utilisés sont basés sur une hypothèse implicite d'indépendance des paramètres vis-à-vis de la position géographique. Lorsque les paramètres présentent une dépendance à l'espace, ceux-ci sont généralement calculés en utilisant principalement les observations locales. Ainsi, les coefficients de la fonction de régression varient dans l'espace et c'est ce que l'on appelle un modèle de régression géographiquement pondérée. Ce modèle part donc d'une hypothèse d'autocorrélation spatiale de la variable dépendante.

En partant de cette même hypothèse, différents modèles de régression et/ou d'apprentissage automatique tels qu'une régression logistique multinomiale, un réseau de neurones, les machines à vecteurs de support (Support Vector Machines) etc. peuvent être considérées pour l'exercice de spatialisation en y intégrant des variables à noyaux.

2.5.3 Enjeux et problématique

Les enjeux abordés dans le cadre de ce projet de recherche se rapportent, entre autres, à la sélection de variables pertinentes, au choix de la méthode ou du modèle et à la définition des indicateurs de qualité. Les applications de chacun de ces enjeux dans le cadre de la génération d'une population synthétique ainsi que dans le cadre de la spatialisation de celle-ci sont développées ci-dessous.

2.5.3.1 Sélection de variables pertinentes

Dans l'exercice de synthèse de population, l'une des premières étapes consiste à définir les variables de contrôle. Comme la population synthétique est élaborée dans le but de l'investir dans des microsimulations des comportements de mobilité, les variables retenues devraient être celles qui manifestent des effets sur les choix de mobilité de la population. Or, les variables de contrôle et leur catégorisation ne demeurent pas sans effet sur la qualité de la population synthétique. Ainsi, une analyse poussée des différentes variables pour en sélectionner un ensemble pertinent s'impose.

Cet enjeu est aussi rencontré dans l'exercice de spatialisation. La spatialisation convoitée consistant à l'association d'un ménage synthétique à une unité de logement du rôle foncier, un défi réside dans la sélection des caractéristiques du ménage et de l'unité de logement qui permettraient d'expliquer leur association. De plus, l'existence d'une certaine corrélation spatiale expliquant en partie cette association i.e. l'influence du voisinage sur le type de ménage dans une unité de logement serait aussi à tester.

2.5.3.2 Type de méthode/modèle

Le choix parmi les différentes méthodes de synthèse de population constitue un autre défi de ce projet de recherche. En considérant la variété de méthodes par ajustement, par simulation et utilisant l'apprentissage profond, une présélection de méthodes ainsi qu'une comparaison des

performances dans le contexte québécois s'avère nécessaire. Une amélioration de méthode voire une méthode personnalisée au contexte local pourrait être requise.

De plus, l'étape subséquente consistant à spatialiser la population synthétique générée, le choix du zonage utilisé pour la synthèse de population est important. Ainsi, la synthèse devrait être effectuée de manière à obtenir la résolution la plus fine possible sans compromettre la qualité de la population synthétique. Les méthodes admettant plusieurs résolutions géographiques sont particulièrement intéressantes dans ce cadre-là.

Enfin, plusieurs modèles d'attribution d'un type de ménage à une unité de logement seront à tester. Ainsi, une interpolation spatiale, une régression géographiquement pondérée, un modèle de régression classique avec des variables à noyaux, un modèle d'apprentissage automatique entre autres, seront à tester et à comparer.

2.5.3.3 Indicateurs de qualité

Des indicateurs permettant d'évaluer la qualité de la synthèse mais aussi de la spatialisation seront à définir. De plus, comme la population synthétique spatialisée sera investie dans la planification des transports, il sera important de ne pas se limiter à des indicateurs statistiques indiquant la qualité des modèles mais de définir aussi des indicateurs de mobilité permettant de mesurer les impacts des différentes alternatives de synthèse de population sur la simulation des comportements de mobilité.

2.5.3.4 Problématique

Ainsi, la problématique des travaux de recherche tourne autour de l'élaboration d'une combinaison optimale de modèles permettant de générer une population synthétique puis de la spatialiser à l'échelle des unités de logement du rôle foncier de manière à reproduire le plus fidèlement possible les comportements de mobilité de la population réelle. La région de Montréal constitue l'étude de cas principale pour les expérimentations.

2.5.4 Objectifs

L'objectif du projet de recherche est de générer une population synthétique de ménages et d'individus et de spatialiser celle-ci en attribuant à chaque ménage synthétique une unité de logement du rôle foncier. Comme cette population synthétique spatialisée sera utilisée dans la recherche en transport, et comme la typologie de ménages élaborée (Fabre, 2018) est considérée déterminante du comportement de mobilité, il faudra que le ménage synthétique soit affecté à une unité de logement qui accueillerait en réalité un ménage du même type.

Il s'agit ainsi de créer à partir des FGMD et des échantillons des enquêtes O-D, une représentation complète et synthétique (i.e. pour des individus non identifiables) des déplacements de la population de la grande région de Montréal. À terme, la procédure permettrait de créer un fichier décrivant la mobilité des 3,8 millions de personnes inventoriées par le recensement canadien, simulant la variabilité spatio-temporelle représentative des conditions réelles de déplacement. Enfin, une contribution réside dans le développement et l'application de modèles tels qu'une régression logistique multinomiale intégrant des variables à noyau, une régression géographiquement pondérée ou des modèles d'apprentissage automatique etc. à l'exercice de synthèse spatialisée de population.

Les trois contributions du projet de recherche seront alors les suivantes :

1. Tester et comparer différentes paramétrisations des méthodes de synthèse que ce soit au niveau de l'échantillon (enquête O-D vs FGMD), des variables de contrôle et de leurs catégorisations, ou du zonage adopté.
2. Établir une méthode de génération d'une population synthétique de ménages et d'individus adaptée au contexte québécois en se basant sur une comparaison des différentes méthodes existantes.
3. Élaborer un modèle d'attribution d'un type de ménage à chaque unité de logement du rôle foncier afin de spatialiser la population synthétique.

2.5.5 Méthodologie

Comme mentionné précédemment, le projet de recherche comprend deux volets i.e. la synthèse de population et la spatialisation de la population synthétique à l'échelle de l'unité de logement, avec comme étude de cas la région de Montréal.

2.5.5.1 Synthèse de population

La première étape consiste donc à synthétiser une population de ménages et d'individus pour la région de Montréal. Comme le but du projet est d'aboutir à une population ponctuellement spatialisée, la synthèse de population à l'échelle géographique la plus petite possible, i.e. celle de l'aire de diffusion voire de l'îlot de diffusion, est considérée. Cela permettrait de limiter les erreurs à l'étape de spatialisation. Toutefois, certains enjeux accompagnent la synthèse à petite échelle tels que les problèmes des arrondis du recensement et la fréquence des 0 autant au niveau de l'échantillon qu'au niveau des distributions marginales. Ainsi, le défi principal de cette étape serait de produire une population synthétique qui, à la fois :

- Est composée de ménages et d'individus
- Est précise i.e. produite à une petite échelle géographique
- Respecte les totaux à grande échelle i.e. à l'échelle de la région
- Présente une distribution conjointe semblable à celle de la population réelle, donc une variabilité de ménages et d'individus suffisante.

Données utilisées

Ainsi, pour générer une telle population synthétique, les données suivantes sont utilisées :

- Données désagrégées : données d'enquêtes O-D enrichies avec la typologie de ménages ; et fichiers de micro-données à grande diffusion (FGMD).
- Données agrégées : tableaux des totaux du recensement et données de la Société de l'Assurance Automobile du Québec (SAAQ).
- Données géographiques : découpage territorial du recensement.

Grandes étapes

Une variété de méthodes de synthèse de population mentionnées dans la revue de littérature sera testée. Parmi les méthodes existantes, un intérêt particulier sera porté à la mise à jour proportionnelle itérative renforcée de Konduri et al. (2016), au réseau bayésien hiérarchique de Sun et al. (2018), et aux méthodes utilisant l'apprentissage profond (Borysov et al., 2019 ; Garrido et al., 2019 ; Johnsen et al., 2020). La comparaison des performances de ces modèles permettra d'avoir une base pour établir une méthode de synthèse efficace dans le contexte québécois. Le projet comportant un volet spatial, la synthèse à plusieurs échelles géographiques demeure

particulièrement intéressante. L'impact sur la qualité de la synthèse des paramètres suivants, entre autres, sera mesuré :

- Le nombre et le type de variables de contrôle ainsi que leurs catégorisations
- L'échantillon utilisé (enquête O-D ou FGMD) et l'utilisation d'échantillons relevant de différentes années
- Le système de zonage

L'évaluation de la qualité de la population synthétique pourrait être effectuée moyennant différents indicateurs tels que l'ajustement de la distribution marginale, l'ajustement de la distribution conjointe, et la variabilité des agents synthétiques. Un exercice de synthèse de l'échantillon en le prenant pour une population totale et en y extrayant un sous-échantillon sera considéré.

À termes, cette étape permettra de définir une méthode de synthèse de population adaptée aux enjeux locaux qui permettra de synthétiser une population totalement énumérée de ménages et individus synthétiques i.e. non identifiables à l'échelle géographique la plus petite possible sans compromettre la qualité de la population synthétique.

2.5.5.2 Spatialisation de la population synthétique

Cette étape hérite de la population synthétique de ménages et individus générée à l'étape précédente et a pour objectif d'attribuer à chaque ménage synthétique une unité de logement répertoriée dans le rôle foncier.

Données utilisées

Pour accomplir la spatialisation de la population synthétique, les données suivantes sont utilisées :

- Données d'enquêtes O-D enrichies avec la typologie de ménages
- Données de recensement : tableaux des totaux et cartes de découpage territorial
- Données des rôles fonciers des années correspondant aux enquêtes O-D utilisées

Grandes étapes

La spatialisation est composée de deux étapes. La première étape consiste à attribuer un type de ménage à chaque unité de logement du rôle foncier i.e. estimer le type de ménage qui va le plus probablement habiter dans chaque unité de logement. Pour la deuxième étape, il s'agit de distribuer les ménages synthétiques sur les unités de logement par correspondance de type et de zone géographique.

La spatialisation exige un travail préliminaire consistant à créer une base de données commune au rôle foncier et l'enquête O-D contenant les ménages typifiés et les unités de logements associées, et leurs caractéristiques respectives. En utilisant cette base de données, plusieurs modèles seront testés notamment la régression géographiquement pondérée (Wheeler & Páez, 2010) et des modèles plus classiques dotés de variables à noyaux tels qu'une régression logistique multinomiale, les réseaux de neurones, et les machines à vecteurs de support entre autres. L'hypothèse d'autocorrélation spatiale i.e. le fait que le type de ménage associé à une unité de logement dépende des types de ménages observés dans le voisinage, est ainsi mise à l'épreuve dans cette étape.

L'impact sur la qualité de la prédiction des paramètres suivants, entre autres, sera mesuré :

- Le type de modèle de prédiction utilisé

- Les variables considérées et la formulation du noyau
- Le zonage

Cela sera effectué moyennant des indicateurs tels que le rappel et la précision, ou en utilisant des matrices de confusion. L'idée du sous-échantillon pourra aussi être utilisée pour tester la qualité de la prédiction du type de ménage dans une unité de logement.

Une fois le modèle de spatialisation le plus performant sélectionné, les ménages synthétiques typifiés sont distribués sur les unités de logement par correspondance de type et de zone géographique ce qui constituera la population synthétique spatialisée de la région de Montréal.

2.5.6 Avancement

2.5.6.1 Synthèse de population

Des expérimentations ont été effectuées pour évaluer l'impact du système de zonage utilisé sur la performance de la mise à jour proportionnelle itérative (enhanced IPU). Ainsi, quatre secteurs de recensement (220, 221, 222 et 224) adjacents et denses en termes de population ont été choisis dans la région de Montréal pour mener les expérimentations. L'échantillon de l'enquête O-D 2013 filtré aux 4 secteurs considérés a été utilisé comme intrant désagrégé à la synthèse de population. Les données agrégées ont été extraites du recensement 2016. Le Tableau 2-10 ci-dessous résume les variables contrôlées et leurs catégorisations.

Tableau 2-10 Variables de contrôle

Variable de contrôle	Catégorie	Description
page (âge des personnes)	1	[0;15[
	2	[15;30[
	3	[30;65[
	4	65+
psex (genre des personnes)	1	Homme
	2	Femme
hsize (taille des ménages)	1	1 personne
	2	2 personnes
	3	3 personnes
	4	4 personnes
	5	5+ personnes

Tel que le montre la Figure 2-31 ci-dessous, quatre niveaux de zonage ont été considérés :

- La région englobant les quatre secteurs de recensement
- Deux groupes de secteurs de recensement (SR) chacun englobant deux SR
- Les secteurs de recensement
- Les aires de diffusion (AD)

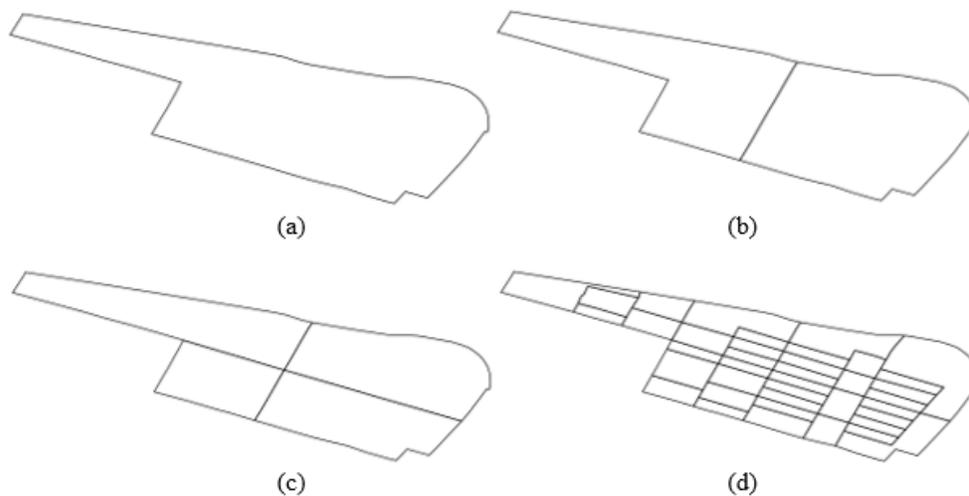


Figure 2-31 Niveaux du système de zonage: (a) Région; (b) Groupe de SR; (c) SR; (d) AD

Scénarios

L'expérience consiste à tester différentes combinaisons de niveaux géographiques pour synthétiser une population pour la région composée des quatre secteurs. Le terme « REGION » correspond au niveau le plus agrégé considéré et le terme « GEO » correspond au niveau le plus désagrégé pour chacun des scénarios. Quatre scénarios ont été testés et sont illustrés sur la Figure 2-32 ci-dessous :

- S1 : SR comme REGION et AD comme GEO.
- S2 : Groupe de SR comme REGION et AD comme GEO.
- S3 : la région comme REGION et les SR comme GEO.
- S4 : la région comme REGION et les AD comme GEO.

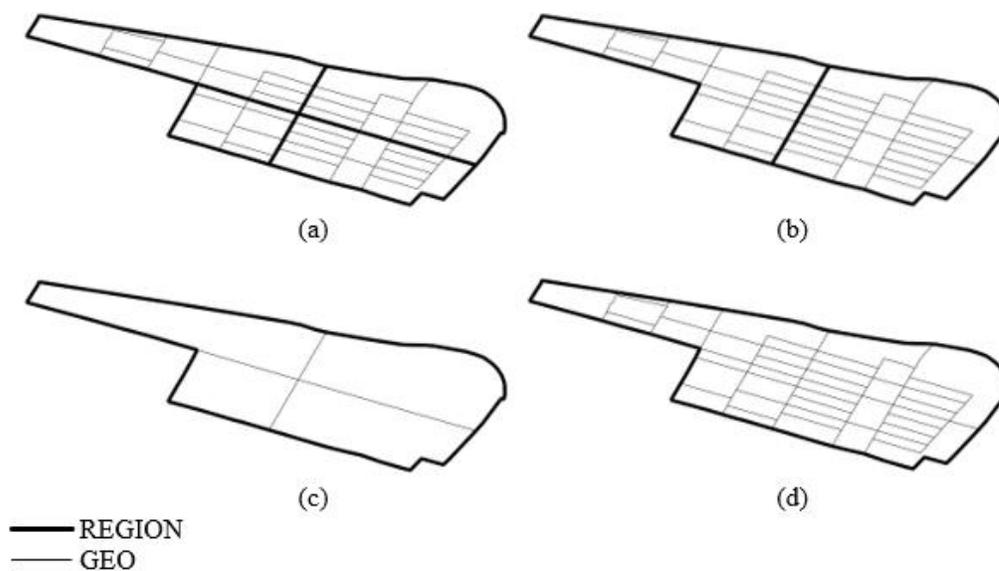


Figure 2-32 Scénarios testés: (a) S1; (b) S2; (c) S3; (d) S4

Comme pour les scénarios 3 et 4, les contraintes de la REGION sont la somme des contraintes des GEO, aucune incohérence n'existait entre les contraintes aux deux niveaux de synthèse. Or, cela n'était pas le cas des scénarios 1 et 2, d'où l'introduction des scénarios 1bis et 2bis. Ces scénarios se distinguent des scénarios 1 et 2 respectivement par le fait que les contraintes au niveau de la REGION sont la somme des contraintes au niveau des aires de diffusion au lieu de celles au niveau du secteur de recensement.

Critères d'évaluation

Différences absolues et relatives

Les différences absolues et relatives donnent des informations différentes sur la qualité de la population synthétique. Pour une différence relative de 0.1, les valeurs des marges dans la population synthétique et la population réelle peuvent être 1 et 10, 10 et 100, 100 et 1000, etc. Donc des amplitudes de différences aussi différentes que 9 et 900 sont représentées par la même différence relative d'où l'importance de calculer les deux indicateurs afin de mieux évaluer la qualité de la synthèse.

La formule de la différence absolue est la suivante :

$$\alpha_i = |m_i - M_i|$$

Où i est l'indice de catégorie d'une variable ($i = 1, 2, \dots, 11$)

m_i est le total de la catégorie i tel que calculé par l'IPU renforcé

M_i est la contrainte de la catégorie i extraite du recensement

L'erreur relative est le quotient de α_i par M_i .

Les sommes des erreurs absolues et relatives pour chaque scénario ont été calculées pour faciliter la comparaison.

Indice de proximité de la population

L'indice de proximité de la population (I_p) permet de caractériser de manière numérique chaque scénario i.e. chaque combinaison de zones. Il s'agit d'une moyenne doublement pondérée du rapport entre la population du GEO et la population de la REGION. La double pondération est utilisée pour rendre l'indice universel i.e. donner un poids égal à la population de chaque GEO et REGION quelle que soit sa taille. La formule de l'indice est la suivante :

$$I_p = \frac{\sum_{R=1}^M \frac{\sum_{G=1}^N \frac{P_G}{P_R} \times P_G}{\sum_{G=1}^N P_G} \times P_R}{\sum_{R=1}^M P_R}$$

Où R réfère à la REGION

G réfère au GEO

M est le nombre de REGIONS pour le scénario

N est le nombre de GEOs pour le scénario

P_G est la population d'un GEO

P_R est la population de la REGION

Pour une REGION fixe, un indice de proximité de la population (I_p) plus élevé correspond à un niveau de GEO plus agrégé. Inversement, pour un GEO fixe, un I_p plus élevé correspond à un niveau de REGION moins agrégé.

Deux indicateurs de la qualité de la population synthétique sont calculés et leurs variations selon le I_p sont évaluées pour comparer les différents scénarios. Les deux indicateurs sont:

- β : la somme des erreurs absolues ($\sum \alpha_i$)
- γ : L'erreur absolue sur le total des agents synthétisés

Ces deux indicateurs sont d'abord calculés pour les individus et les ménages séparément puis pour les individus et les ménages ensemble. Un scénario avec une somme faible de α_i a forcément une faible erreur sur les totaux. Cependant, une somme élevée de α_i ne donne aucune information concernant l'erreur sur les totaux. Par exemple, une population synthétique de moins avec un déficit de 100 hommes et un surplus de 100 femmes par rapport à la population réelle a une somme de α_i de 200 pour une erreur nulle sur le total d'individus synthétisés.

Afin d'évaluer l'effet des incohérences entre les totaux des différents niveaux géographiques du recensement, S1bis et S2bis sont comparés à S1 et S2 respectivement. De plus, afin de rendre la comparaison des différentes combinaisons géographiques équitable, et puisque S3 et S4 ne sont pas pénalisés par les incohérences entre les niveaux géographiques du recensement, les indicateurs sont comparés pour les scénarios S1bis, S2bis, S3 et S4.

Comparaison des résultats

La comparaison de S1 et S1bis d'une part, et S2 et S2bis d'autre part montre que les incohérences entre les strates géographiques considérées pour l'IPU renforcé nuisent fortement à la qualité de la population synthétique.

Tableau 2-11 Erreurs absolues pour les variables de contrôle, par catégorie, par scénario

Control Variable	Categories	α_i					
		S1	S1bis	S2	S2bis	S3	S4
page	1	0	24	8	4	44	11
	2	56	2	75	88	37	26
	3	2	1	334	56	12	60
	4	74	3	53	31	35	18
	Total	132	30	470	179	128	115
psex	1	18	12	462	11	14	35
	2	69	5	951	27	33	5
	Total	87	17	1413	38	47	40
hsize	1	10	10	10	10	0	10
	2	0	0	0	0	0	0
	3	\$	\$	\$	\$	0	\$
	4	\$	\$	\$	\$	0	\$
	5	10	10	10	10	0	10
	Total	30	30	30	30	0	30

Comme le montrent les Figure 2-33 et Figure 2-34 ci-dessous, S3 ayant le I_p le plus élevé, est le seul scénario avec un ajustement parfait de la distribution des ménages ($\beta = \gamma = 0$). S3 utilise une combinaison des niveaux géographiques les plus agrégés avec la région comme REGION et les SRs pour GEOs. S4 utilise la région comme REGION et les aires de diffusion comme GEOs au lieu des SRs. Son I_p est par conséquent très bas. S3 performe mieux que S4 pour ce qui a trait à la distribution des ménages. Cela montre que plus la combinaison de REGION et GEO est agrégée, mieux l'ajustement de la distribution des ménages synthétique est.

Tableau 2-12 Erreurs relatives pour les variables de contrôle, par catégorie, par scénario

Control Variable	Categories	α_i/M_i					
		S1	S1bis	S2	S2bis	S3	S4
page	1	0.0%	0.7%	0.2%	0.1%	1.3%	0.3%
	2	1.2%	0.0%	1.6%	1.9%	0.8%	0.6%
	3	0.0%	0.0%	3.4%	0.6%	0.1%	0.6%
	4	2.1%	0.1%	1.5%	0.9%	1.0%	0.5%
	Total	0.6%	0.1%	2.2%	0.8%	0.6%	0.5%
psex	1	0.2%	0.1%	4.2%	0.1%	0.1%	0.3%
	2	0.7%	0.0%	9.3%	0.3%	0.3%	0.0%
	Total	0.4%	0.1%	6.6%	0.2%	0.2%	0.2%
hsize	1	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.0%	0.3%
	2	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	3	0.4%	0.4%	0.4%	0.4%	0.0%	0.4%
	4	0.5%	0.5%	0.5%	0.5%	0.0%	0.5%
	5	1.2%	1.2%	1.2%	1.2%	0.0%	1.2%
	Total	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.0%	0.3%

Généralement, plus le niveau géographique considéré est désagrégé, plus les totaux nuls sont fréquents dans le recensement ce qui nuit à la synthèse de population. Toutefois, les totaux nuls pour les attributs des ménages sont plus fréquents que ceux des attributs des individus puisque les individus sont naturellement plus nombreux que les ménages.

Si le niveau d'agrégation de la REGION est élevé et celui du GEO est bas (comme pour S4), les totaux nuls dans la distribution des ménages au niveau du GEO resteront assez fréquents ce qui nuirait à la qualité de la synthèse. Par conséquent, utiliser une combinaison de niveaux assez agrégés améliorerait l'ajustement de la population de ménages.

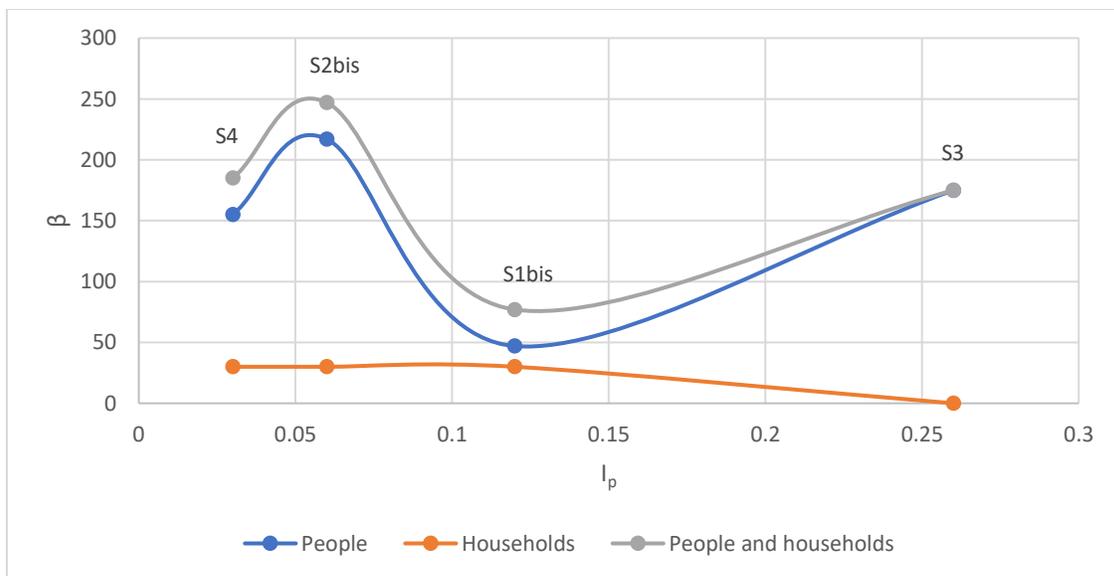


Figure 2-33 Somme des erreurs absolues (β) selon I_p

En ce qui concerne la population d'individus, S1bis est le meilleur scénario avec une erreur nulle sur le total d'individus synthétisés ($\gamma = 0$) et l'erreur β la plus basse. S1bis utilise une combinaison des niveaux les plus désagrégés, les REGIONS correspondant aux SRs et les GEOs aux ADs. Parmi les trois scénarios utilisant les ADs pour GEOs (S1bis, S2bis et S4), S1bis a le I_p le plus élevé i.e. la REGION au niveau le moins agrégé. Cela montre que deux facteurs améliorent la qualité de la synthèse au niveau des individus : l'utilisation de niveaux d'agrégation bas en gardant un I_p élevé. Cela implique qu'une combinaison à niveau d'agrégation bas est meilleure pour la synthèse d'individus, contrairement à la synthèse de ménages qui requiert une paire plutôt agrégée.



Figure 2-34 Erreurs sur les totaux (γ) selon I_p

Si l'on considère la performance globale du IPU renforcé pour les différents scénarios, le scénario S1bis demeure le meilleur. Ainsi, les dommages causés par les niveaux désagrégés à la population de ménages sont moins importants que les dommages causés par les niveaux agrégés à la distribution d'individus. Ainsi, il est suggéré d'utiliser la paire de zones les plus désagrégées disponibles dans le recensement si le but est d'assurer le meilleur ajustement pour les populations de ménages et d'individus simultanément moyennant l'IPU renforcé.

Enfin, il est important de signaler que la taille de la zone utilisée dans cette étude est une limitation significative de celle-ci, et que la généralisation des constats émis aurait besoin de plus d'investigation sur une zone plus large et/ou plus stratifiée. Des travaux de recherche plus approfondis sont ainsi en cours pour les régions métropolitaines de recensement de Montréal, Toronto et Vancouver.

2.5.6.2 Spatialisation de la population synthétique

Des travaux ont été amorcés pour évaluer et caractériser l'interaction spatiale entre les types de ménages de l'enquête O-D en utilisant des modèles logit multinomiaux. L'étude de cas considérée est le secteur municipal du Plateau-Mont-Royal. Pour cela, des variables à noyau ont été intégrées dans les modèles comparés en plus des variables caractérisant les unités de logement. Différents rayons ont été testés pour les variables à noyau utilisées.

Les modèles intégrant des variables à noyau se sont avérés meilleurs que les autres, ce qui montre que le type de ménage dans une unité de logement est généralement aussi expliqué par les fréquences des types de ménages dans son entourage. De plus, la comparaison de la performance

des modèles avec les différents rayons a montré que le type de ménage dans une unité de logement est le plus corrélé avec son entourage immédiat. Enfin, la significativité des variables à noyau introduites dans les modèles a été examinée et l'existence d'interactions spatiales entre les types de ménages a par conséquent été confirmée.

2.5.7 Conclusion

Le projet de synthèse spatialisée de population consiste à créer à partir de différentes sources de données agrégées et désagrégées une population de ménages et d'individus totalement énumérée et spatialisée à l'échelle de l'unité de logement. L'étude de cas principale du projet de recherche est à la région de Montréal.

Le projet de recherche comporte deux volets principaux : la génération d'une population synthétique et la spatialisation de celle-ci. Une méthode de synthèse à plusieurs niveaux géographiques (IPU renforcé) a été testée en utilisant différentes combinaisons de niveaux géographiques afin d'évaluer la fluctuation de la qualité de synthèse en fonction de la combinaison adoptée. Pour la région considérée, une synthèse aux niveaux les moins agrégés s'est avérée globalement meilleure. Pour ce qui a trait à la spatialisation, des modèles logit multinomiaux, incluant des variables à noyau, ont été testés pour évaluer et caractériser une éventuelle interaction spatiale entre les types de ménages de l'enquête O-D. L'existence d'une telle interaction a été confirmée et il s'est avéré que le type de ménage dans une unité de logement est particulièrement affecté par la fréquence des différents types de ménages dans son voisinage immédiat.

Il s'agit donc de créer, à partir des échantillons des enquêtes O-D entre autres, une représentation complète et synthétique (i.e. pour des individus non identifiables) des déplacements de la population de la grande région de Montréal. À terme, la procédure permettrait de créer un fichier décrivant la mobilité des 3,8 millions de personnes inventoriées par le recensement canadien, simulant la variabilité spatio-temporelle représentative des conditions réelles de déplacement.

2.6 Comment évaluer la qualité et la diversité des alternatives de transport en commun?

- Par : Charlotte Poirier, maîtrise
- Supervision : Pre Catherine Morency
- Contexte : Chaire Mobilité

2.6.1 Introduction

2.6.1.1 Mise en contexte

La planification des réseaux de transport en commun (TC) est loin d'être une mince tâche. Il faut assurer l'efficacité des déplacements et l'équité d'accès, le tout en étant compétitif par rapport à l'automobile. Dans un contexte où le besoin en options de mobilité durable est criant, il est nécessaire de s'interroger sur l'attractivité du transport en commun. De nombreux facteurs contribuent à le rendre attractif, dont la diversité des trajets qu'un usager peut emprunter pour se déplacer entre une origine et une destination à un moment particulier. La présence d'un plan B, soit d'au moins une 2^e alternative de transport en commun, rend l'utilisateur moins vulnérable face à des imprévus ou incidents sur le réseau (van Wee, Bert, van Cranenburgh, & Maat, 2019).

Une alternative de transport en commun est définie comme une séquence spécifique de routes et de correspondances entre une origine et une destination (Frappier, 2015). Autrement dit, c'est un trajet disponible pour effectuer un déplacement à un moment précis. La diversité d'alternatives de transport en commun fait référence à la quantité d'alternatives différentes dont dispose un usager pour effectuer un déplacement spécifique. Par exemple, la Figure 2-35 illustre une paire origine-destination (OD) pour laquelle 3 alternatives de transport en commun sont disponibles.

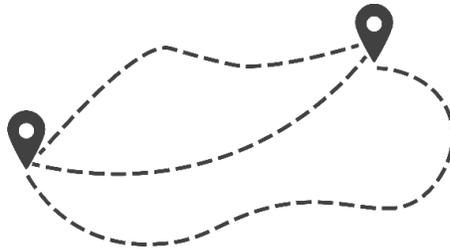


Figure 2-35. Alternatives de transport en commun pour une paire origine-destination

2.6.1.2 Problématique

Plusieurs questions émergent lorsqu'on s'intéresse à la qualité et la diversité des alternatives de transport en commun. Tout d'abord, qu'est-ce qu'une bonne alternative TC? Comment établir un seuil de qualité minimale? Combien d'alternatives de transport en commun de qualité suffisante faut-il pour augmenter l'attractivité du transport en commun? Est-ce que la distribution de la qualité et de la diversité des alternatives est équitable?

2.6.1.3 Objectifs

L'objectif général de ce projet de recherche est de développer une méthode d'évaluation de la qualité et de la diversité des alternatives de transport en commun. Pour y parvenir, il faut d'abord proposer des seuils de qualité minimale, puis évaluer la diversité d'alternatives en fonction de ces seuils. Ensuite, analyser la répartition des alternatives de qualité suffisante par type de population et par secteur afin de faire ressortir les enjeux d'équité. Enfin, adapter la méthode afin d'évaluer

la qualité et la diversité des alternatives de transport bimodales, à savoir celles impliquant le recours à un mode d'accès au transport en commun autre que la marche.

2.6.1.4 Hypothèses

La première hypothèse est que certaines alternatives de transport en commun n'atteignent pas un seuil minimal de qualité. Autrement dit, on suppose que certaines alternatives n'ont même pas le niveau minimum pour être considérées par les usagers comme une option véritable. En ce sens, la deuxième hypothèse est que tous les usagers n'ont pas accès à un même niveau de qualité et de diversité des alternatives de transport en commun. La troisième hypothèse est que lorsqu'un individu a un plan B pour effectuer un déplacement en transport en commun, la probabilité qu'il choisisse ce mode est plus élevée. Avoir un plan B implique d'avoir un minimum de deux alternatives de TC qui relient une origine spécifique à une destination spécifique au moment souhaité. Frappier (2015) avait également suggéré dans ses travaux que l'attractivité du transport en commun augmente si plus d'une alternative de qualité est disponible pour ce mode.

2.6.2 Revue de la littérature

Il existe très peu de littérature sur l'importance de la diversité d'alternatives de transport en commun. L'accent est surtout dirigé vers l'étude du choix de route, mais pas sur la pertinence d'avoir plusieurs trajets possibles parmi lesquels choisir (Grisson, Burkhardt, & Gyselinck, 2017; Raveau, S., Guo, Munoz, & Wilson, 2014; Raveau, Sebastián, Muñoz, & Grange, 2011). Des auteurs introduisent la notion de substituabilité, soit la mesure à laquelle la meilleure alternative peut être remplacée par une alternative moins attractive (van Wee, Bert et al., 2019). Toutefois, ils mettent de l'avant le fait que le niveau de substituabilité ne dépend pas uniquement de la disponibilité des alternatives, mais également de la connaissance de l'existence de ces alternatives par les individus concernés (van Wee, Bert et al., 2019). Par ailleurs, ils ont démontré qu'un plus haut niveau de substituabilité augmente la flexibilité des déplacements et réduit la vulnérabilité des usagers liée aux perturbations du réseau (van Wee, Bert et al., 2019). Une perturbation fait référence à un événement qui, de manière directe ou indirecte, cause une réduction ou interruption considérable du service sur un lien, une route ou un réseau (Yang, Chen, Ning, & Tang, 2017). Un usager qui est dépendant d'un seul trajet est beaucoup plus vulnérable à ces perturbations qu'un usager qui dispose de plusieurs alternatives de transport en commun.

Tous les usagers du transport en commun n'ont pas le même niveau de vulnérabilité. La diversité de transport en commun n'est pas distribuée de manière uniforme ou équitable sur le territoire (van Wee, B. & Geurs, 2011). Il existe des déserts de transport en commun, soit des secteurs dans lesquels la demande en transport en commun, par les populations dépendantes à ce mode, est nettement supérieure à l'offre (Jiao, 2017). Par endroits, l'offre de transport en commun n'est pas disponible en quantité suffisante. Selon l'approche sufficientariste, étant très liée à la notion d'équité, il existe un seuil sous lequel un individu peut se retrouver en déficit (Michaud, 2019). Ce seuil peut faire référence à la quantité d'alternatives de transport en commun, mais également à leur qualité minimale à satisfaire.

La qualité est une notion assez subjective. De nombreux auteurs ont étudié les préférences déclarées et les préférences révélées des usagers afin de mieux comprendre leur point de vue (Anderson, Nielsen, & Prato, 2014; Arentze & Molin, 2013; Chowdhury, Ceder, & Schwalger, 2015; dell'Olio, Ibeas, & Cecin, 2011; Kim, Kim, Seo, & Kim, 2020). Plusieurs de ces études ont démontré que la perception du transport en commun varie selon les caractéristiques sociodémographiques (âge, genre, revenu), le contexte géographique et les caractéristiques du déplacement (Bosea & Pandita, 2020). Le temps se révèle être le plus grand facteur d'influence de la qualité d'une

alternative de transport en commun. En effet, la perception de la valeur du temps n'est pas la même à bord du véhicule que pour la marche, l'attente ou les correspondances (Anderson et al., 2014; Arentze & Molin, 2013; Bovy & Hoogendoorn-Lanser, 2005; Litman, 2008). D'autres facteurs que le temps ont également une influence sur la qualité du transport en commun, du point de vue de l'utilisateur, notamment le confort et la sécurité (Zhou, Jia, & Du, 2015).

2.6.3 Méthodologie

La méthode générale consiste à évaluer l'impact de la qualité et de la diversité des alternatives sur le choix modal. Pour y parvenir, il faut d'abord générer des alternatives de transport en commun, à partir d'un échantillon de paires origine-destination. Pour celles-ci, l'évaluation de la diversité s'effectue selon la qualité relative et la qualité absolue des alternatives, dans une optique de sufficientarisme. Ensuite il sera possible d'évaluer l'équité et l'impact de la qualité et de la diversité des alternatives sur le choix modal.

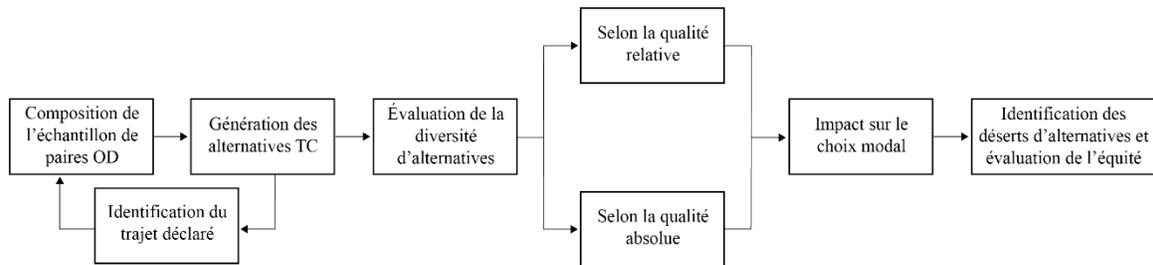


Figure 2-36. Schéma méthodologique

2.6.3.1 Données

La source de données utilisée pour ce projet de recherche est l'enquête Origine-Destination 2018. Seuls les déplacements de l'enquête Origine-Destination pour lesquels le mode déclaré est le transport en commun unimodal ont été retenus. L'enquête de 2018 compte 368 982 déplacements, dont 48 818 se sont faits en transport en commun unimodal. De ce sous-ensemble, les paires OD dont les coordonnées sont manquantes, identiques pour l'origine et la destination ou situées hors du territoire d'étude ont été retirées. Les déplacements pour lesquels les lignes empruntées sont inconnues sont également retirées puisqu'il est impossible d'identifier le trajet déclaré. Il reste donc 47 671 déplacements.

2.6.3.2 Génération des alternatives

Les alternatives de transport en commun sont générées via la plateforme Transition, développée par la Chaire Mobilité de Polytechnique Montréal. Elle modélise et simule des déplacements en transport en commun pour obtenir des itinéraires en considérant l'heure de départ et calcule le temps de chaque composante du déplacement. Cette plateforme utilise un algorithme de plus court chemin pour identifier l'alternative la plus rapide pour chaque déplacement de l'enquête OD. En d'autres mots, cela permet d'identifier le trajet pour lequel l'heure d'arrivée est la plus hâtive en fonction de l'heure déclarée pour la paire OD concernée. Afin de pallier les biais liés à l'enquête OD quant à l'heure de départ déclarée, une fenêtre temporelle de ± 15 minutes est appliquée pour chaque déplacement.

Une fois cette première alternative identifiée, un autre algorithme est requis pour générer l'ensemble des autres alternatives disponibles pour cette même paire origine-destination. La méthode consiste à retirer, une à une, chacune des lignes de transport en commun de la première alternative trouvée, puis à réappliquer l'algorithme de calcul de plus court chemin pour trouver les alternatives subséquentes (Bourbonnais, Verreault, & Morency, 2019). Le même processus est

appliqué à répétition jusqu'à ce qu'un des paramètres initiaux soit atteint. Cela permet de générer un ensemble d'alternatives uniques, soit ayant chacune une différente combinaison de lignes.

Des paramètres initiaux sont introduits afin de limiter le nombre d'alternatives générées à un maximum de 50 et réduire le temps de calcul. Un temps maximal de marche de 15 minutes pour l'accès à l'origine ou à la destination est appliqué, calculé selon une vitesse de marche de 5 km/h. Enfin, les alternatives composées uniquement de segments de marche, donc sans utilisation du transport en commun, sont retirées par un processus de nettoyage.

Au total, pour les déplacements en transport en commun unimodal déclarés à l'enquête OD de 2018, ce sont 707 707 alternatives qui sont trouvées pour 47 160 paires OD. Cela signifie qu'il y a 511 (1,1%) paires OD pour lesquelles aucune alternative de transport en commun n'est trouvée selon les paramètres de calcul initiaux.

2.6.3.3 Identification du trajet déclaré

Une fois l'ensemble des alternatives générées pour les déplacements TC unimodaux, on cherche à identifier quelle alternative correspond au trajet déclaré dans l'enquête Origine-Destination de 2018. Pour ce faire, il faut, au préalable, convertir les numéros de ligne pour obtenir un identifiant comparable. En effet, les numéros de lignes générées par Transition possèdent un identifiant unique associé à un numéro de ligne GTFS alors que les numéros de ligne de l'enquête OD sont en numérotation Maudituc. L'identifiant unique de ligne (uuid) obtenu par Transition est, tout d'abord, associé à un identifiant unique d'agence et numéro GTFS. Ensuite, selon l'agence, le numéro GTFS et un dictionnaire de conversion, il est possible d'obtenir l'équivalence en numérotation Maudituc selon la méthode illustrée à la Figure 2-37.

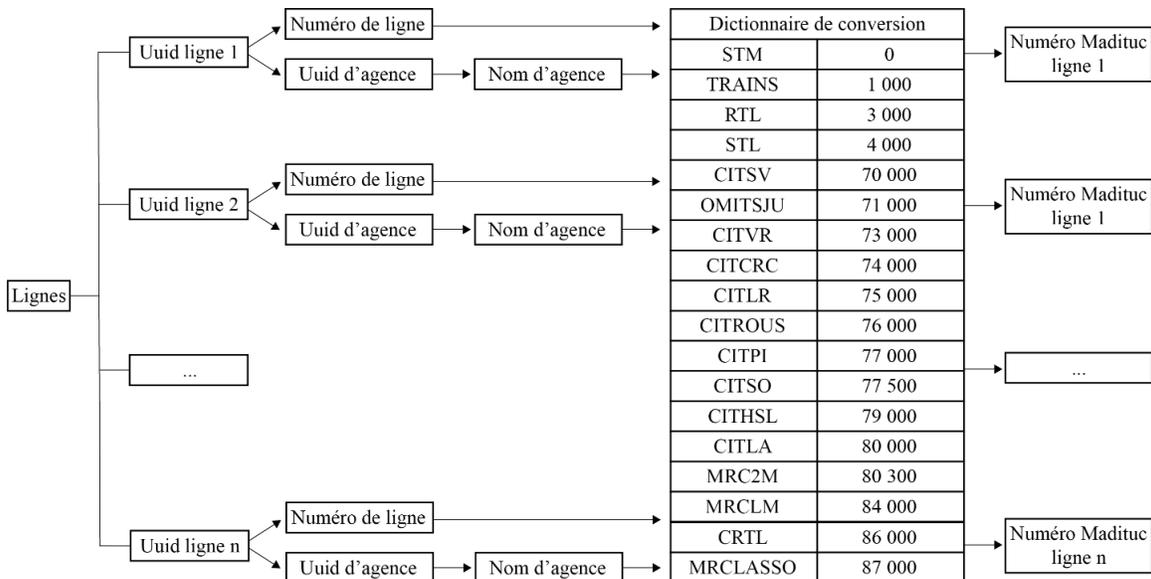


Figure 2-37. Méthode de conversion de numéro de ligne

Lors du processus de conversion, les alternatives proposant des lignes dont l'identifiant n'a pas d'équivalence Maudituc sont retirées. Celles-ci sont surtout les lignes spéciales et les taxis collectifs. De ce fait, il reste désormais 696 503 alternatives pour 47 125 paires OD. Cette étape a donc retiré des paires OD, leurs seules alternatives disponibles ayant été supprimées, portant le nombre de paires OD sans alternative de transport en commun à 546.

Le processus d'identification du trajet déclaré présenté à la Figure 2-38 est appliqué aux alternatives restantes. Pour chaque alternative proposée, le nombre de lignes empruntées est comparé à celui du trajet déclaré. Ensuite, si le nombre de lignes empruntées est identique, on regarde si la première ligne proposée est la même que la première ligne déclarée. On procède ainsi pour chaque ligne subséquente jusqu'à avoir vérifié chacune des lignes. L'alternative choisie correspond à celle avec la même combinaison de lignes que le trajet déclaré dans l'enquête OD.

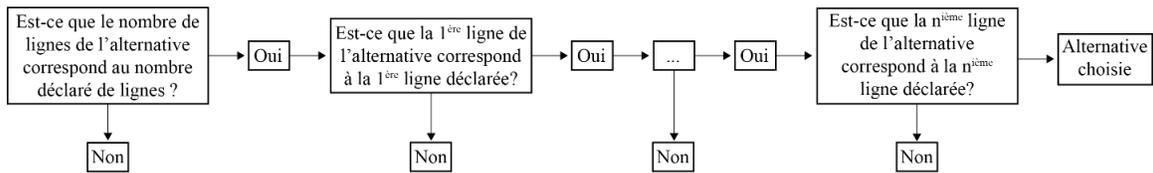


Figure 2-38. Identification de l'alternative choisie

À la suite de la conversion, il est possible de comparer le trajet déclaré à l'ensemble des alternatives générées pour chaque paire OD afin d'identifier l'alternative correspondante. L'alternative choisie a donc été identifiée pour 33 678 paires OD, soit pour 70,7% des déplacements déclarés en transport en commun unimodal. Les paires OD pour lesquelles le trajet déclaré n'a pas été généré dans le bassin d'alternatives sont retirées de l'échantillon pour la suite des analyses. Afin de vérifier les causes potentielles pour lesquelles le trajet déclaré ne se trouve pas parmi les alternatives proposées, une analyse comparative a été effectuée. Aucune différence significative n'a été identifiée.

2.6.4 Diversité brute

Un total de 441 873 alternatives sont générées pour 33 678 paires OD. Le nombre moyen d'alternatives par paire OD est de 13,12 et la médiane se situe à 7 alternatives par paire OD. Dû aux paramètres initiaux de calculs implantés dans la plateforme Transition, le nombre maximal d'alternatives générées est de 50 par paire OD. La Figure 2-39 illustre la distribution des déplacements selon le nombre d'alternatives TC disponibles. On remarque que 14,4% des paires OD n'ont pas de plan B.

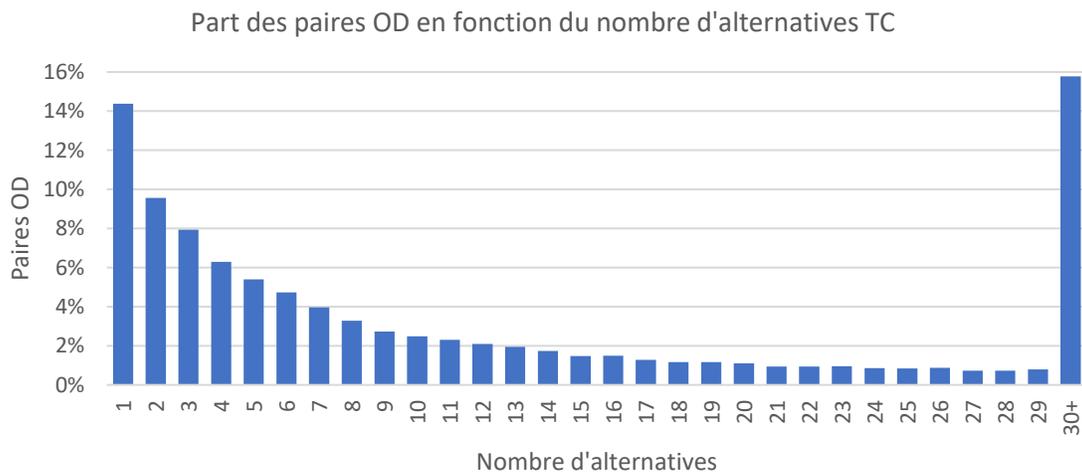


Figure 2-39. Distribution des paires OD selon le nombre d'alternatives de transport en commun

Cependant, comme nous l'avons émis comme hypothèse, ces alternatives n'ont pas toutes le même niveau de qualité. Ainsi, bien que la diversité d'alternatives de transport en commun par paire OD semble élevée dans l'échantillon étudié, certaines alternatives sont meilleures que d'autres. D'ailleurs, plusieurs d'entre elles n'ont pas une qualité équivalente à l'alternative la plus rapide. Sachant cela, restent-elles des alternatives intéressantes pour l'utilisateur?

2.6.5 Qualité relative

Afin de prendre en compte la qualité des alternatives, un seuil de qualité relative est proposé. Celui-ci a pour valeur de référence l'alternative la plus rapide parmi l'ensemble des alternatives proposées pour une paire OD. Pour chaque paire OD, l'alternative la plus rapide est identifiée. Contrairement au trajet le plus court généré par Transition, qui cherche à minimiser l'heure d'arrivée à partir du début de la période de ± 15 minutes par rapport à l'heure déclarée, l'alternative la plus rapide est celle dont le temps de parcours total est le plus court. Cette alternative la plus rapide devient donc la valeur de référence pour évaluer la qualité relative. À partir du temps de parcours de celle-ci, un facteur multiplicatif est calculé pour chaque alternative TC disponible par paire OD. De ce fait, il est possible de voir selon quelle mesure une alternative donnée est plus lente que la plus rapide.

$$\text{facteur multiplicatif de temps de parcours} = \frac{\text{temps total de l'alternative}}{\text{temps total de l'alternative la plus rapide}}$$

Équation 1. Facteur multiplicatif de temps de parcours

La Figure 2-40 présente la distribution fréquentielle des facteurs multiplicatifs de temps de parcours pour l'ensemble des alternatives de l'échantillon. Un facteur de 1,00 correspond à l'alternative la plus rapide. La valeur maximale observée est de 5,26 (Tableau 2-13), mais les alternatives avec un facteur multiplicatif supérieur à 2,00 ne représentent que 1,6% de l'ensemble de l'échantillon. La valeur moyenne des facteurs multiplicatifs est identique à la médiane, soit de 1,35.

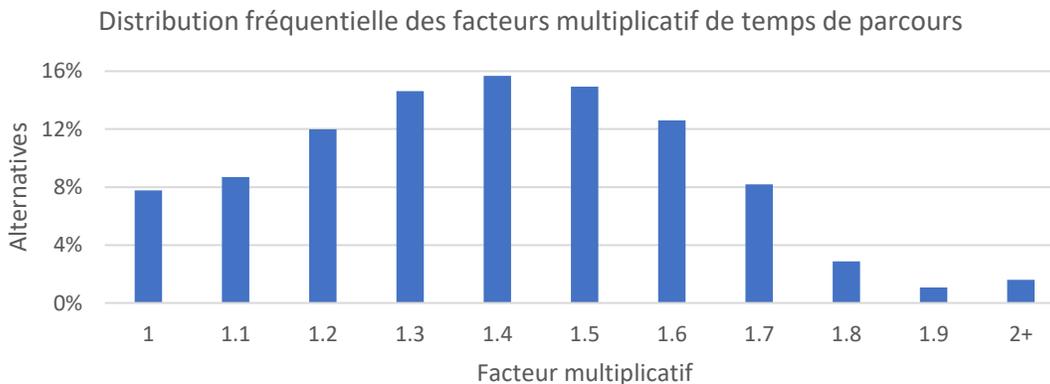


Figure 2-40. Distribution fréquentielle des facteurs multiplicatifs de temps de parcours

Tableau 2-13. Résumé statistique des facteurs multiplicatifs de temps de parcours

Minimum	1 ^{er} quartile	Médiane	Moyenne	3 ^e quartile	Maximum
1,00	1,17	1,35	1,35	1,51	5,26

Bien que certaines alternatives atteignent un facteur multiplicatif supérieur à 2,00, cette valeur a été fixée comme seuil minimal de qualité. À la suite d'un filtrage, les alternatives dont le facteur multiplicatif de temps de parcours par rapport au trajet le plus court est supérieur à ce facteur de 2,00 sont retirées de l'échantillon pour la suite des analyses. Par exemple, la Figure 2-41 illustre une paire OD pour laquelle il y a 3 alternatives de transport en commun. Le trajet le plus court est identifié en bleu. L'alternative ayant un facteur multiplicatif de 2,17 est donc retirée.

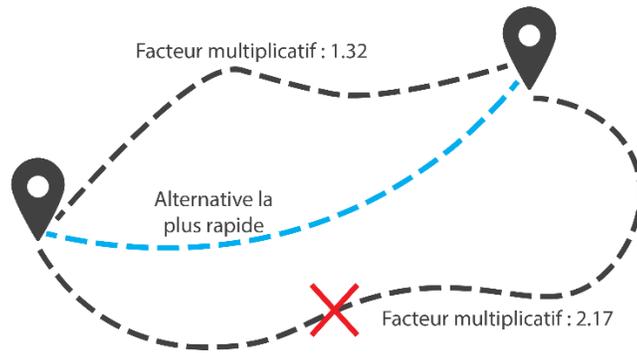


Figure 2-41. Exemple de facteurs multiplicatifs pour une paire OD

2.6.5.1 Effet de seuils de qualité minimale sur la diversité d'alternatives

Afin de vérifier l'hypothèse selon laquelle certaines alternatives de transport en commun n'atteignent pas un seuil minimal de qualité, l'effet de seuils de qualité relative sur la diversité est étudié. La Figure 2-42 présente la distribution des paires OD selon le nombre d'alternatives de transport en commun pour 4 facteurs multiplicatifs de temps de parcours par rapport au trajet le plus court. Plus le seuil proposé est restrictif (facteur plus faible), plus on observe une diminution du nombre d'alternatives par paire OD. Pour un facteur assez restrictif de 1,25, plus du quart des paires OD n'ont qu'une seule alternative TC disponible. Pour un facteur plus permissif, comme 1,75 ou 2,00, plus du quart des paires OD ont 15 alternatives TC ou plus.

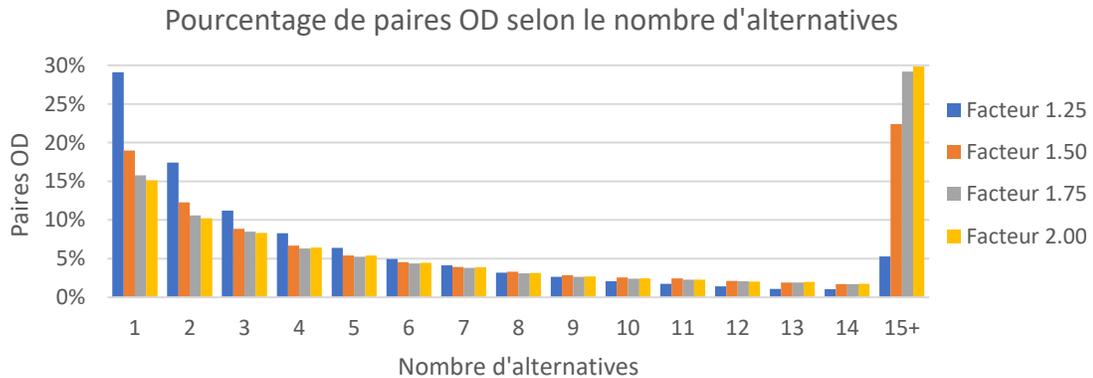


Figure 2-42. Distribution des paires OD selon le nombre d'alternatives de transport en commun en fonction du facteur multiplicatif

Il est intéressant de constater que peu importe le seuil minimal proposé, le nombre maximal de 50 alternatives par paire OD est atteint. Le nombre moyen d'alternatives par paire OD pour les facteurs de 1,75 et de 2,00 est très similaire à celui obtenu sans seuil de qualité minimale (13,12).

Tableau 2-14. Résumé statistique du nombre d'alternatives par paire OD selon les seuils de qualité relative

	Minimum	1 ^{er} quartile	Médiane	Moyenne	3 ^e quartile	Maximum
Facteur de 1.25	1	1	3	4,7	6	50
Facteur de 1.50	1	2	5	9,7	13	50
Facteur de 1.75	1	2	6	12,7	18	50
Facteur de 2.00	1	3	7	13,0	19	50

La diversité et la qualité ne sont toutefois pas distribuées de manière égale sur le territoire. Les Figure 2-43 et Figure 2-44 présentent la distribution du nombre d'alternatives moyen par paire OD selon leur secteur d'origine ou de destination du déplacement pour les quatre facteurs multiplicatifs proposés. Le filtrage en fonction des seuils de qualité relative réduit la diversité d'alternatives pour chacun des secteurs. Encore une fois, la différence entre les facteurs de 1,75 et de 2,00 est négligeable.

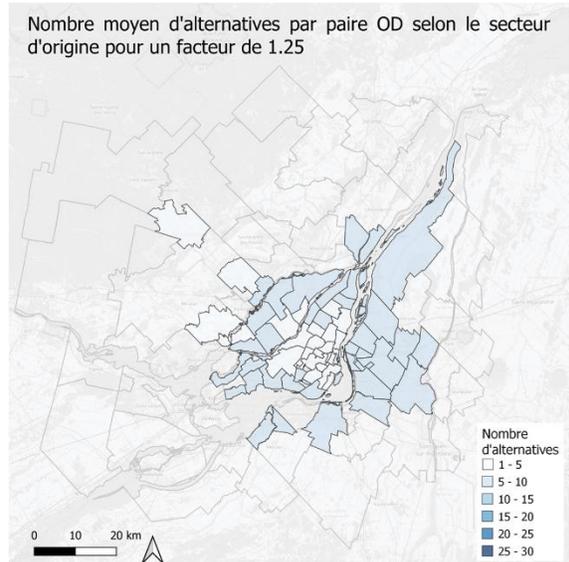
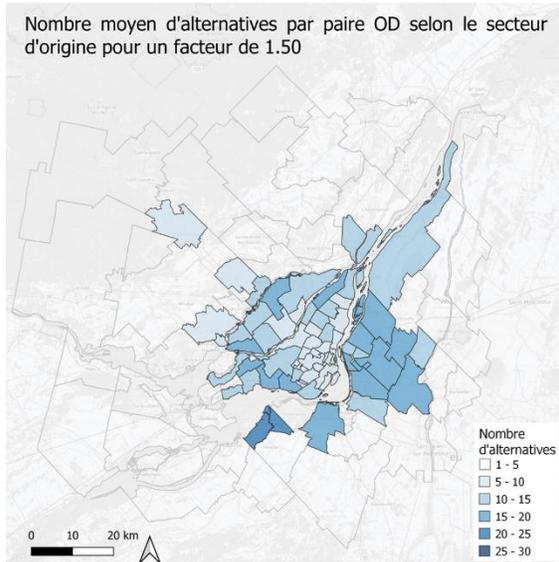
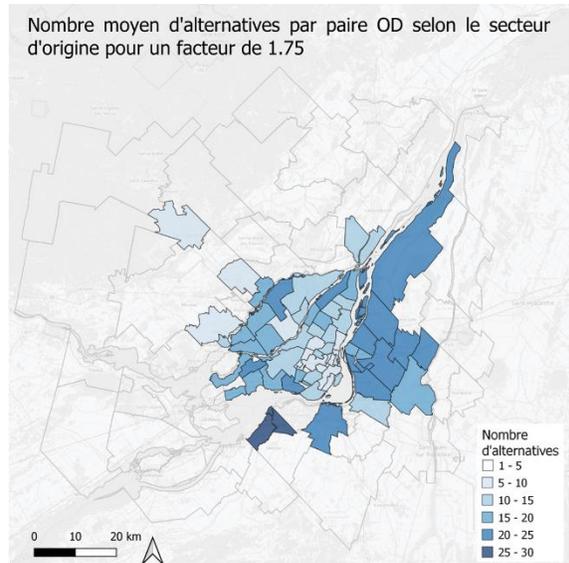
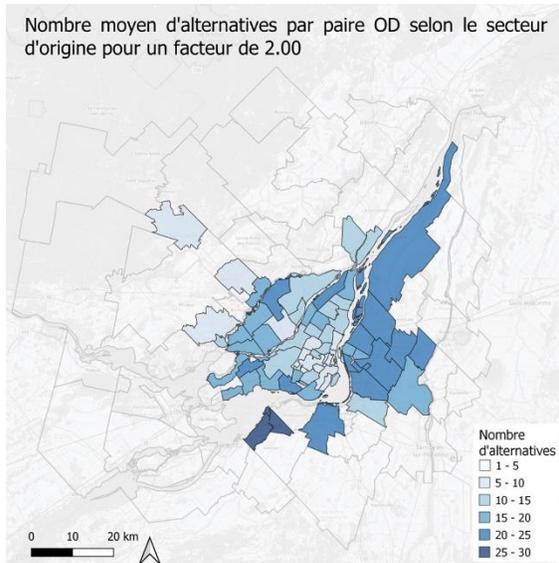


Figure 2-43. Nombre moyen d'alternatives par paire OD selon le secteur d'origine et le facteur multiplicatif de temps de parcours (excluant les retours au domicile)

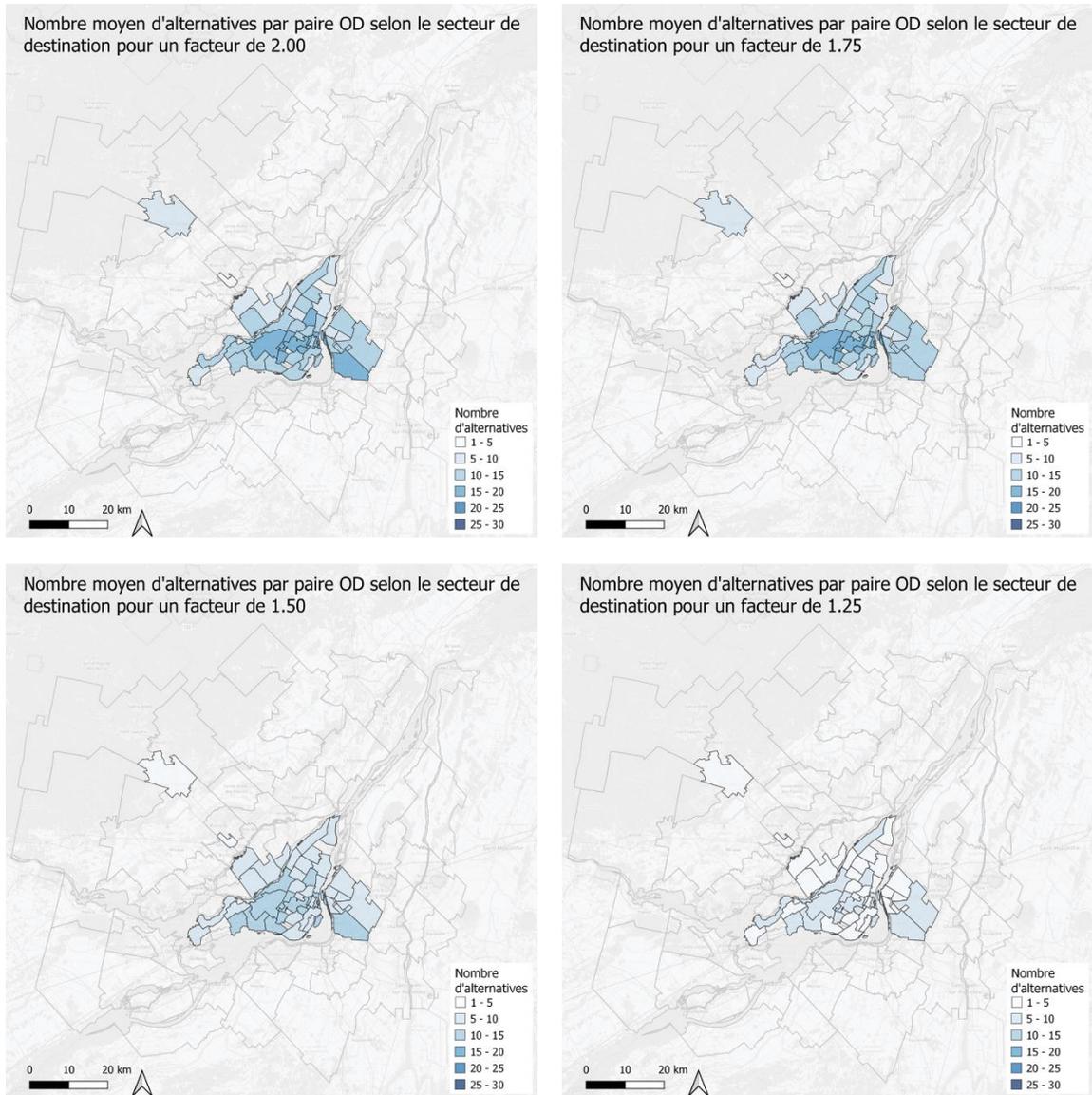


Figure 2-44. Nombre moyen d'alternatives par paire OD selon le secteur de destination et le facteur multiplicatif de temps de parcours (excluant les retours au domicile)

Néanmoins, l'un des déterminants majeurs dans le choix du transport en commun est sa disponibilité autant à l'origine qu'à la destination, au moment souhaité. Les matrices origine-destination, présentées à la Figure 2-45, montrent le nombre moyen d'alternatives par paire OD selon le facteur multiplicatif appliqué. Comme on peut s'y attendre, la diversité d'alternatives est plus faible plus le facteur multiplicatif de temps de parcours par rapport à la meilleure alternative est bas. Pour chacun des facteurs, les déplacements internes ont une plus faible diversité d'alternatives. Également, on observe une certaine symétrie dans la diversité d'alternatives entre les secteurs d'origine et de destination. Les secteurs en gris pâle ne contiennent pas, ou trop peu, d'observations de déplacements en transport en commun déclarés dans l'enquête OD de 2018. Ils ne sont pas représentés dans le bassin d'alternatives étudié, il est donc impossible d'évaluer leur nombre moyen d'alternatives TC par paire OD.

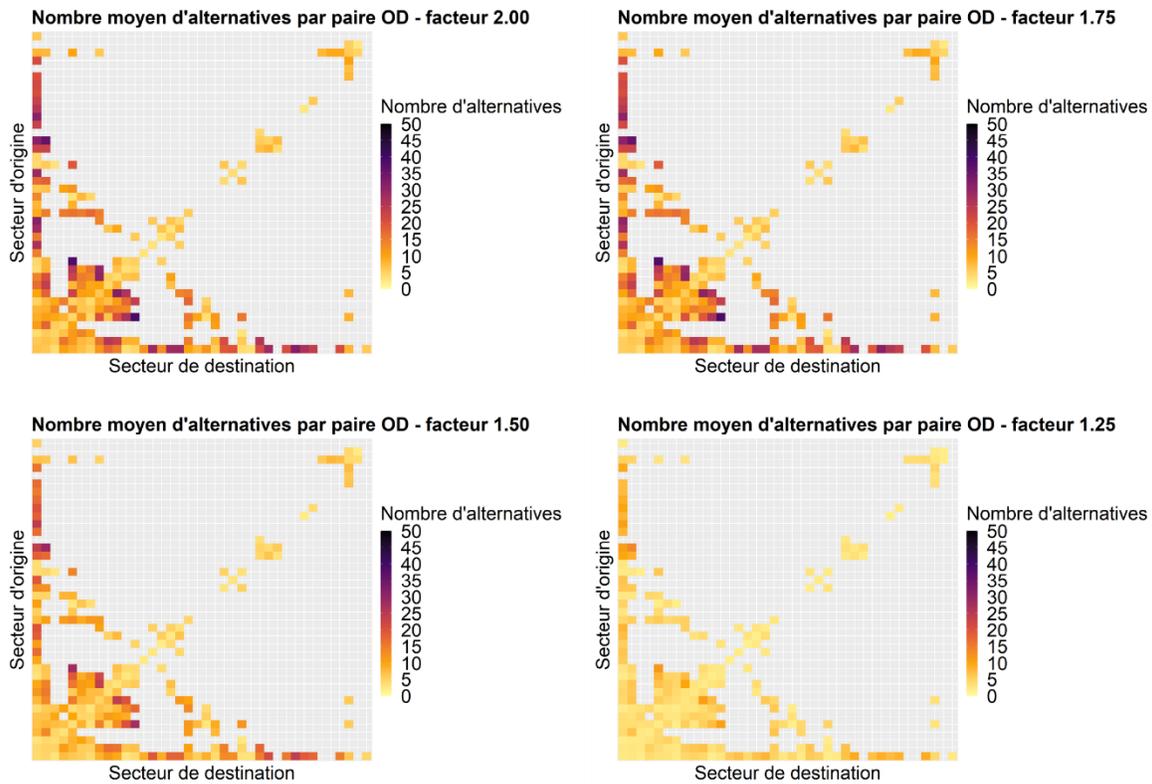


Figure 2-45. Matrices du nombre moyen d'alternatives par paire OD selon le facteur multiplicatif de temps de parcours

Bref, l'introduction de seuils de qualité minimale, basés sur une qualité relative, diminue la diversité d'alternatives. Cette méthode permet de filtrer les alternatives qui, en comparaison avec l'alternative la plus rapide, n'ont pas une qualité suffisante. Cependant, la qualité de l'alternative la plus rapide n'est pas prise en compte, ce qui ne permet pas une évaluation réaliste de la qualité et de la diversité d'alternatives de transport en commun. En effet, cette comparaison n'est valide que si l'alternative la plus rapide est de qualité suffisante. Afin de pallier cette limitation, une mesure objective s'avère nécessaire pour vérifier le niveau de qualité de l'alternative la plus rapide pour chacune des paires OD. Ce concept de qualité absolue est actuellement en développement.

2.7 Analyse des interactions entre étalement urbain et offre et demande en transport

- Par : Mohamed Saoudi Hassani, maîtrise
- Supervision : Pre Catherine Morency
- Contexte : Chaire Mobilité

2.7.1 Contexte et objectifs

La croissance de la population canadienne a été cinq fois plus rapide en banlieue qu'au centre-ville entre 2006 et 2016. Près de 67,5% de la population habite actuellement en régions péri-métropolitaines (Gordon et al. 2018). Le navettage en provenance des régions limitrophes à la communauté métropolitaine de Montréal (CMM) est en forte augmentation et engendre, quotidiennement, des pics de déplacements.

Près de 40% de la population de 30 municipalités limitrophes à la CMM navette régulièrement vers le centre-ville et 94% des voyageurs choisissent de conduire leur automobile pour se déplacer (Observatoire du grand Montréal, 2020). La conséquence directe de ce phénomène est l'augmentation de la congestion et des temps de déplacement.

L'objectif de l'étude en cours est de mettre en perspective la dynamique de l'étalement urbain, de l'offre et de la demande en transport. Comprendre les tendances d'évolution d'indicateurs caractérisant ces trois éléments, permettra de mieux anticiper les besoins en transport de la population et de cibler les politiques permettant de soutenir le développement durable des villes et régions métropolitaines. La région de Montréal est utilisée comme étude de cas.

2.7.2 Méthodologie

Pour réussir la mise en perspective citée précédemment, une méthodologie en trois étapes est adoptée :

Étape 1 : Quantifier l'étalement urbain à l'aide d'indicateurs et en évaluer la pertinence

Plusieurs indicateurs d'étalement urbain ont été documentés, mais leur pertinence varie en fonction des besoins et des domaines de recherche des auteurs (Bhatta, 2010). Une revue de littérature visant à identifier les indicateurs d'étalement urbain a permis de les catégoriser. Leur pertinence est évaluée à travers l'applicabilité à la zone d'étude, la disponibilité des données et la clarté et simplicité d'interprétation.

Ces indicateurs sont calculés pour des régions péri-métropolitaines présentant des profils de croissance particuliers puis comparés aux territoires connaissant des transformations plus limitées.

Étape 2 : Quantifier l'évolution de l'offre et de la demande en transport

Grace aux données des enquêtes Origine-Destination (OD), des résultats d'une affectation descriptive de ces données sur le réseau routier supérieur, de l'enquête nationale des ménages (ENM) et des données de Statistiques Canada, il est possible d'établir une analyse comparative de l'évolution des données, sur 20 ans, afin de faire ressortir les changements au niveau des distances, temps et capacités routières offertes pour différents segments de population.

Étape 3 : Mise en perspective

L'évolution de l'offre et de la demande en transport est par la suite mise en perspective avec les différents profils de croissance des territoires, résultant de la première étape.

Cela permet d'évaluer les impacts de l'étalement urbain sur les coûts individuels et collectifs de transport ainsi que de procéder à l'estimation d'impacts possibles de scénarios de transformation du territoire et de l'offre de transport.

2.7.3 Résultats et travaux en cours

Cette étude contribuera à clarifier la relation entre l'évolution de l'étalement urbain, de l'offre et de la demande en transport.

En mettant en perspectives le résultat des calculs des indicateurs, il est possible d'expliquer l'impact de l'augmentation de capacité routière sur l'évolution des temps de déplacements, sur l'espace d'activités de la population d'un secteur donné et sur la densification des territoires.

Plusieurs indicateurs ont été recensés et calculés pour caractériser les secteurs étudiés; pour en citer quelques-uns (Galster et al., 2001, Jaeger and Schwick, 2014):

- *Indicateur de densité de bâtiments* : indicateur reflétant le nombre moyen d'unités résidentielles par kilomètre carré de terrain aménageable dans une zone urbaine.
- *Indicateur de continuité*, qui est un indicateur permettant de caractériser le degré auquel les bâtiments sont repartis de manière continue à travers une zone d'étude.
- *Indicateur de concentration*, qui permet de calculer le degré auquel le développement se situe de manière disproportionnée, dans relativement peu de kilomètres carrés de la zone d'étude totale, plutôt que répartis uniformément sur toute la surface.
- *Indicateur de centralité*, qui caractérise comment le développement résidentiel ou non résidentiel est situé à proximité du centre-ville urbain.
- *Indicateur de nucléarité* : qui est la mesure selon laquelle une zone urbaine se caractérise par un schéma de développement mononucléaire (par opposition à un schéma polynucléaire).
- *Prolifération urbaine pondérée*, qui est un indicateur permettant de combiner schémas d'utilisation de sol et son occupation à travers le nombre de personnes et d'emplois de la zone.

Chacun des indicateurs cités permet une caractérisation des zones ayant subi ou sujettes au phénomène d'étalement urbain. Cela permet donc d'isoler certains profils types de secteurs à mettre en perspectives avec les résultats de l'augmentation de capacité routière.

2.9 Codification et utilisation du réseau intérieur du centre-ville de Montréal

- Par : Jean-Simon Bourdeau, ing., associé de recherche
- Contexte : Chaire Mobilité

2.9.1 Introduction

De nos jours, plusieurs outils de détermination des itinéraires routiers sont disponibles pour estimer les coûts de transport, en durée ou en distance, entre une origine et une destination. La plupart de ces outils utilisent des graphes de nœuds et de liens afin de représenter les différents réseaux. Cependant, la plupart de ces outils utilisent une approche en deux dimensions pour la connexité du graphe et ne considèrent pas les liens verticaux. Au mieux, ceux-ci sont intégrés au graphe en les aplatissant. Cette approche est adéquate lors des calculs d'itinéraires pour des modes motorisés comme l'automobile ou le transport collectif, mais elle l'est moins lorsque des calculs doivent être faits pour des modes actifs, particulièrement la marche.

Les liens verticaux, comme les ascenseurs ou les marches, sont déjà intégrés en tant qu'objets dans la spécification d'OpenStreetMap (OSM). Cependant, la spécification actuelle d'OSM ne permet pas l'intégration de liens verticaux dans des graphes qui permettent de faire des calculs de chemins.

Le texte est divisé de la manière suivante : premièrement, les objectifs du projet sont présentés. Ensuite, la méthodologie ainsi que le processus de codification sont présentés. Par la suite, une étude de cas sur la ville intérieure de Montréal est présentée. Finalement, une conclusion sur les résultats ainsi que les limites de la méthode est posée.

2.9.2 Objectifs

Le projet de recherche vise à proposer un processus de codification et une intégration des liens verticaux dans un graphe qui permet de faire des calculs de chemins pour la marche.

2.9.3 Revue de la littérature

Les espaces intérieurs urbains sont souvent sous-utilisés; pourtant ceux-ci peuvent être mis à contribution dans un réseau urbain afin de permettre le déplacement de personnes ou de marchandises. Par exemple, en Suisse il a été démontré que cette sous-utilisation était expliquée par des facteurs économiques, sociaux et légaux (Maire, 2011). La ville intérieure de Montréal, aussi connue sous le nom de réseau intérieur de Montréal ou RESO, a toujours été d'un grand intérêt. Michel Boisvert a notamment été directeur de l'Observatoire de la ville intérieure et avait présenté une modélisation des débits de piétons dans la ville intérieure (Boisvert, 2005).

Plusieurs travaux de recherche se sont intéressés aux zones piétonnes (Sayyadi & Awasthi, 2013), à l'analyse des débits de piétons (Løvås, 1994) et aux facteurs affectant l'usage de la marche (Raji, 2014).

Le calcul d'itinéraires intérieurs reste souvent théorique, mais quelques applications ont été faites, par exemple une API permettant la navigation intérieure sur le campus de l'Université Alpen Adria en Autriche. Cette API utilise le système de gestion de bases de données PostgreSQL et son extension de calcul de chemins pgRouting (indrz, 2020).

2.9.4 Méthodologie

La section qui suit présente le cadre méthodologique qui a été utilisé pour la codification de la ville intérieure de Montréal. Le processus de codification des liens verticaux est aussi présenté.

2.9.4.1 Cadre méthodologique

L'outil utilisé pour la codification dans ce projet de recherche s'appelle JOSM. Il s'agit d'un éditeur de réseaux OpenStreetMap. Il permet notamment l'importation et la modification de fichiers osm qui sont compatibles avec OpenStreetMap. Une des raisons pour lesquelles JOSM a été utilisé est qu'il permet de filtrer les objets OSM, ce qui s'avère très utile lors de la codification d'un réseau piéton sur plusieurs niveaux. Une fois les modifications terminées dans le logiciel JOSM, un outil qui s'appelle osm2po permet de convertir le fichier osm en un fichier de type SQL. Par la suite, le fichier sql peut être importé dans le système de gestion de bases de données (SGBD) PostgreSQL, ce qui permet de profiter de son extension spatiale pgRouting. Une fois que toutes ces étapes sont réalisées, les calculs de chemins peuvent être faits sur le réseau piétonnier à l'aide de commandes sql.



Figure 2-46. Processus de codification d'un réseau piéton intérieur en utilisant des données d'OpenStreetMap

2.9.4.2 Processus de codification des liens verticaux

Afin de pouvoir faire l'intégration des liens verticaux dans un graphe, la première étape consiste à développer une norme de codification. La norme qui est développée ici comprend quatre types de liens verticaux. Le premier type de lien n'est pas un lien vertical, il s'agit de liens piétons standards qui peuvent être identifiés comme étant des liens de transport (*highway*) de type *footway* dans la spécification d'OpenStreetMap. Ces liens peuvent être présents à n'importe quel étage d'un bâtiment donné. L'étiquette *level* indique l'étage auquel se trouve le lien piéton, par exemple le 2^e étage (*level* = 2) dans la Figure 2-47

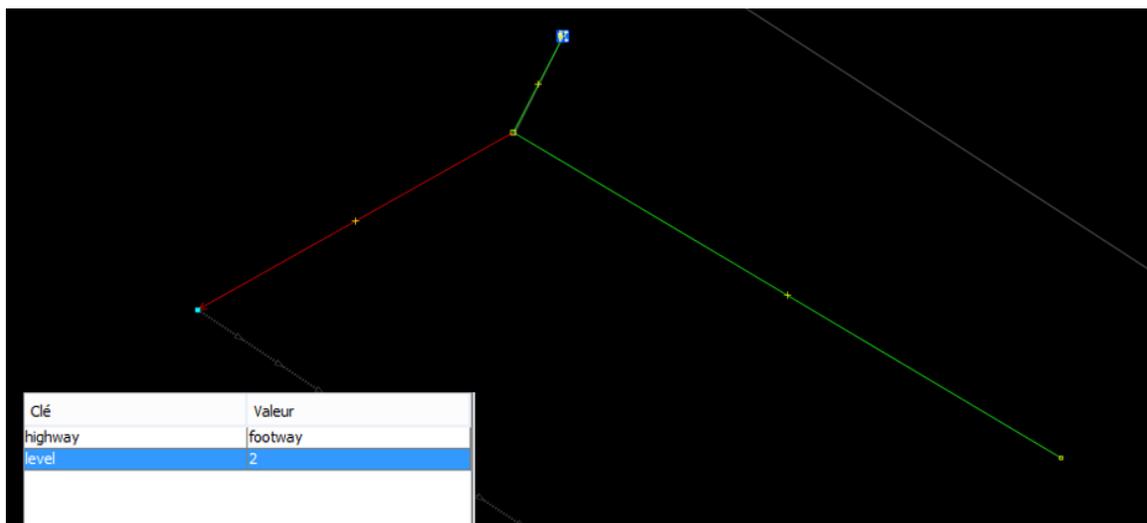


Figure 2-47. Exemple de codification d'un lien piéton (*footway*) dans JOSM

Le second type de lien correspond aux escaliers roulants. Ce type de lien est codifié comme un lien de transport (*highway*) de type *stair*, avec la particularité d'être à sens unique (*oneway=yes*) et dont le sens d'entraînement est dans le même sens que le lien (*conveying=forward*). Un exemple de codification d'un escalier roulant est montré à la Figure 2-48. L'étiquette *indoor=yes* est facultative pour le réseau intérieur mais elle peut quand même être appliquée.

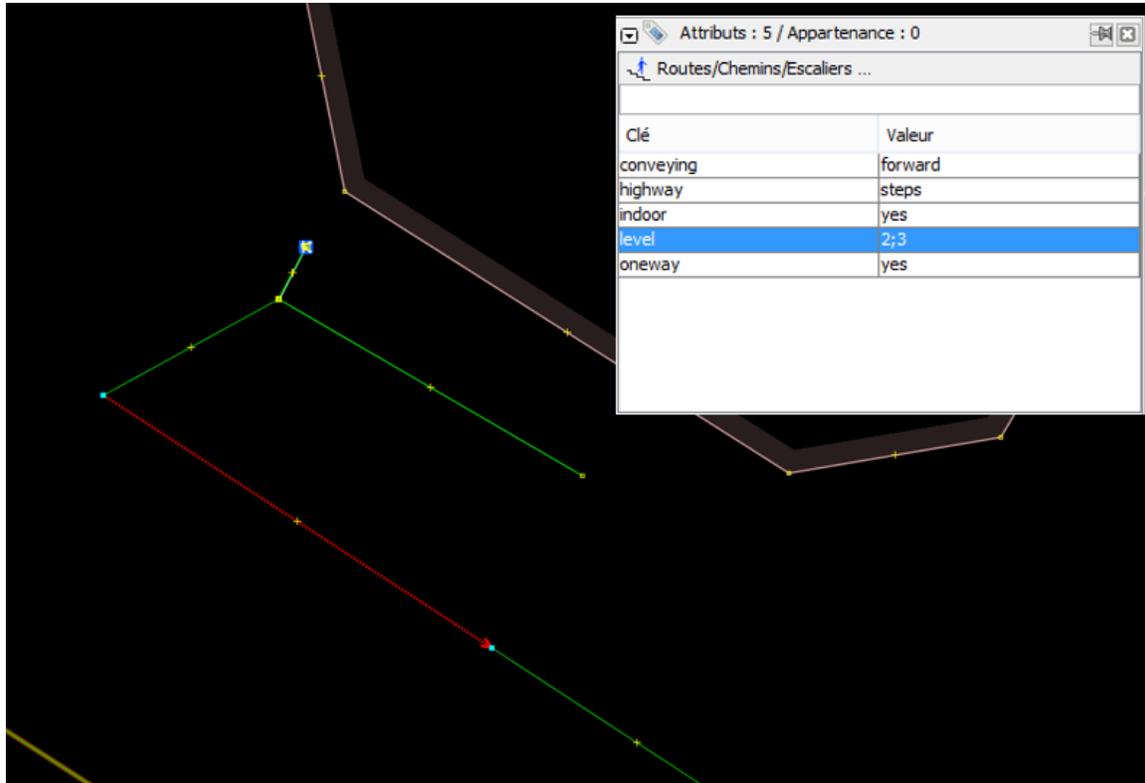


Figure 2-48. Exemple de codification d'un escalier roulant dans JOSM

Le troisième type de lien correspond aux escaliers. Ce type de lien connecte deux niveaux entre eux et est bidirectionnel. Il est codifié de manière similaire à un ascenseur (*highway=steps*), mais sans les étiquettes *conveying=forward* et *oneway=yes*.

Le dernier type de lien correspond aux ascenseurs, qui permettent eux aussi d'aller d'un niveau à un autre. La codification des ascenseurs est faite en deux étapes. Premièrement, un lien est dessiné au niveau le plus bas, par exemple le niveau 2 sur la Figure 2-49. Ensuite, l'ascenseur est codifié comme un point, avec une étiquette indiquant la liste de niveaux accessibles en ascenseur, par exemples les niveaux 2 à 4 sur la Figure 2-49. Les niveaux accessibles peuvent soit être une plage de niveaux, par exemple 2-4 veut dire les niveaux 2, 3 et 4, ou une liste de niveaux, par exemple 2;4 veut dire les niveaux 2 et 4. De plus, il est nécessaire de créer des liens liés au points sur les niveaux 3 et 4 afin de connecter les niveaux 3 et 4 à l'ascenseur.

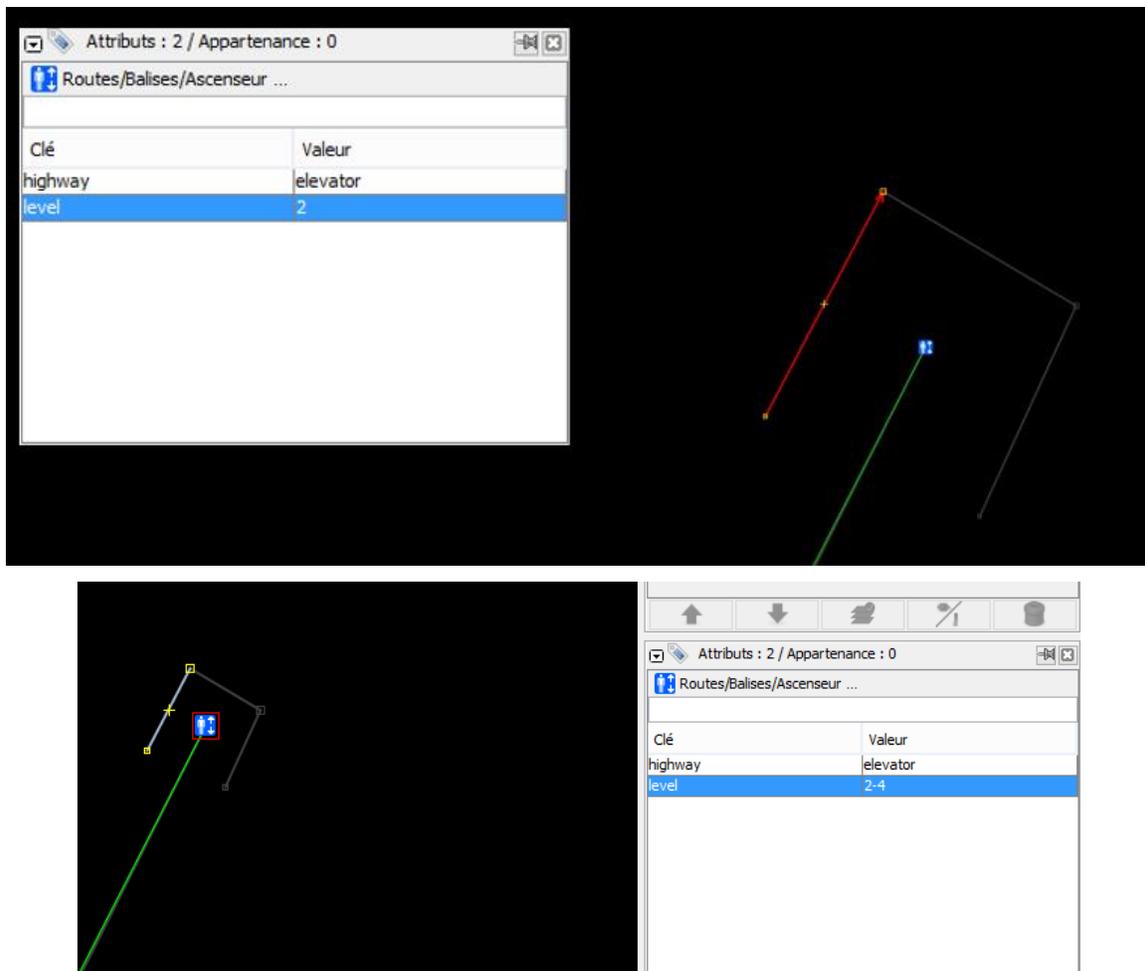


Figure 2-49. Exemple de codification d'un ascenseur dans JOSM

2.9.5 Étude de cas

L'étude de cas qui est présentée ici est le réseau intérieur du centre-ville de Montréal. Il s'agit d'un vaste réseau de liens piétons, d'escalier fixes ou roulants et d'ascenseurs reliant des commerces et bureaux situés dans plusieurs bâtiments du centre-ville. Plusieurs stations du métro de Montréal sont aussi connectées au réseau intérieur. Le réseau codifié est présenté à la Figure 2-50. Les points sur cette figure représentent les accès aux stations de métro à partir de l'extérieur, soit les entrées des édicules des stations de métro.

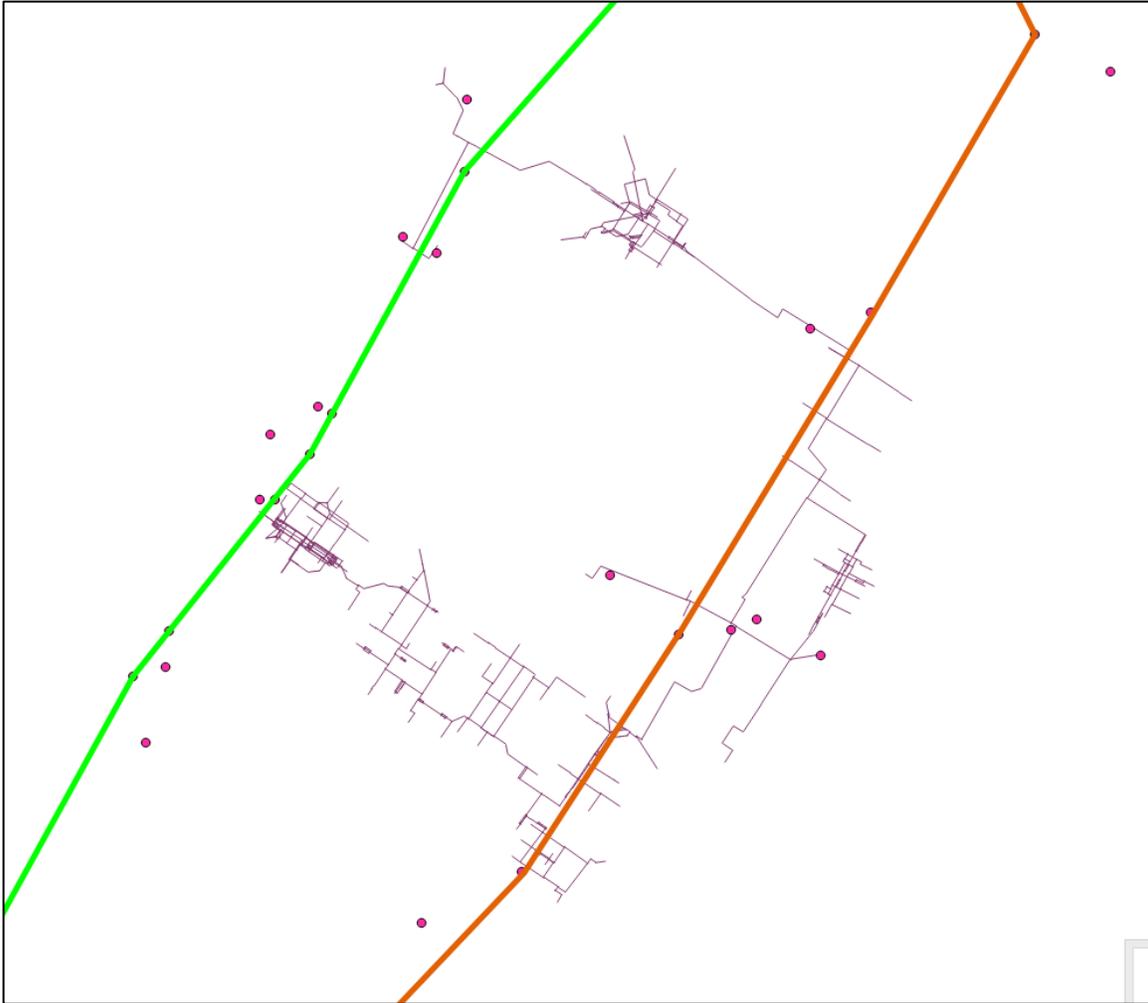


Figure 2-50. Illustration du réseau codifié et des stations de métro liées

Plusieurs centaines de liens ont été codifiés, et le nombre de liens codifiés par type est présenté dans le Tableau 2-15. Un total de 340 liens a été codifiés, de ceux-ci environ les 2/3 ne sont pas des liens verticaux, alors que le tiers restant sont des liens verticaux constitués en majorité d'escalier fixes ou roulants.

Tableau 2-15. Nombre de liens codifiés par type

Type de lien	Nombre de liens codifiés
Lien piétonnier	224
Escalier (steps)	47
Escalier roulant (escalator)	55
Ascenseur	14

Afin d'évaluer l'impact du réseau intérieur sur les itinéraires piétons, un ensemble de commerces actifs qui sont dans les bâtiments connectés au réseau intérieur a été codifié. Ces commerces sont

présentés à la Figure 2-51. Au total, 433 commerces ont été codifiés, et la majorité d'entre eux se retrouvent dans les bâtiments suivants :

1. Complexe Desjardins ;
2. Promenades de la Cathédrale ;
3. Centre Eaton ;
4. Place Montréal Trust ;
5. Cours Mont-Royal ;
6. Mille de la Gauchetière ;
7. Place Ville-Marie.

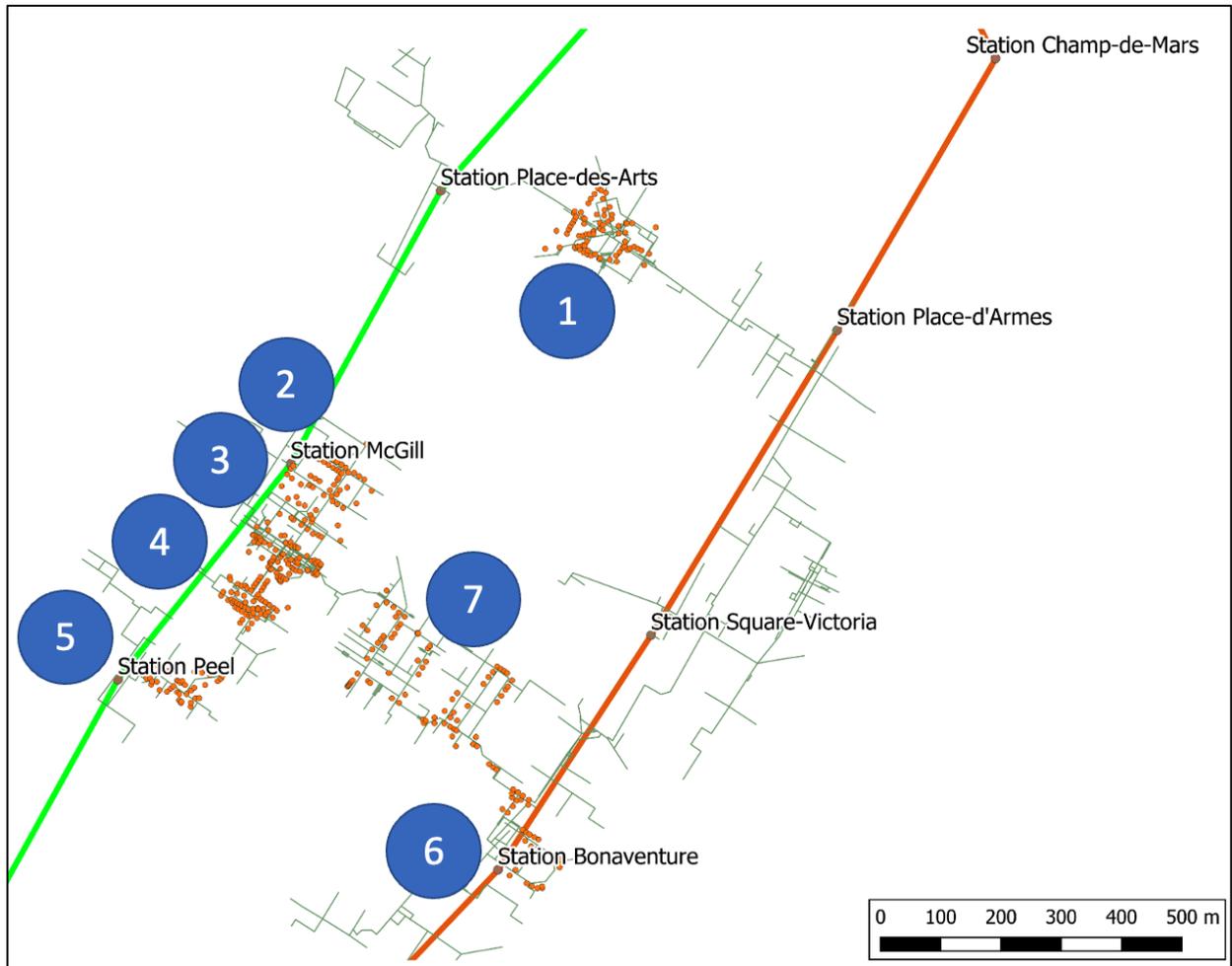


Figure 2-51. Illustration des commerces codifiés pour l'étude de cas

Une matrice de distance a été construite depuis chaque commerce vers l'ensemble des autres commerces, pour un total de 187 056 chemins (433×432) à calculer. Pour chaque paire de commerces, deux chemins ont été calculés : un chemin pouvant utiliser, en partie ou en totalité, le réseau intérieur, et un autre chemin ne pouvant pas utiliser le réseau intérieur. Ensuite, une comparaison des deux types de chemins est faite.

Sur les 187 056 chemins, 183 612 chemins ont pu être calculés avec succès, pour un taux de succès de 98.2 %. Sur ces chemins, 44.4 % de ceux-ci ont pu être raccourcis en utilisant le réseau intérieur,

tel que montré dans le Tableau 2-16. La distance totale de l'ensemble des chemins est passée de 106 246 km à 98 505, pour une réduction de 7.7 %.

Tableau 2-16. Résumé de l'impact, en nombre de chemins, de l'utilisation du réseau intérieur

Nombre de chemins calculés avec succès	183 612
Nombre de chemins avec une réduction de distance	81 603
% des chemins calculés avec une réduction de distance	44.4 %

En regardant l'impact du réseau intérieur sur la distance totale parcourue, la distance totale a été réduite de 7.3 % ou plus de 7 700 km sur une distance initiale de 106 000 km. La distance moyenne sans le réseau intérieur était d'environ 579 mètres et elle est passée à 536 mètres avec la prise en compte du réseau codifié. Cette réduction peut paraître faible, mais en considérant que plus de 44 % des paires de commerces ont vu une réduction de distance, cela veut dire que les chemins dont la distance a été réduite l'ont été en moyenne de 16.5 %, ou une réduction moyenne d'environ 1/6 de la distance pour ces paires.

Tableau 2-17. Résumé de l'impact, en distance, de l'utilisation du réseau intérieur

	Distance [km]
Distance totale sans le réseau codifié	106 246
Distance totale avec le réseau codifié	98 505
% de réduction	7.3%

En regardant les réductions de distance sous forme de boîte à moustaches sur la Figure 2-52, la réduction médiane est d'environ 68 mètres, le premier quartile est autour de 30 mètres et le troisième quartile est autour de 130 mètres, ce qui signifie que pour 75 % des observations, une réduction minimale de 30 mètres a pu être observée.

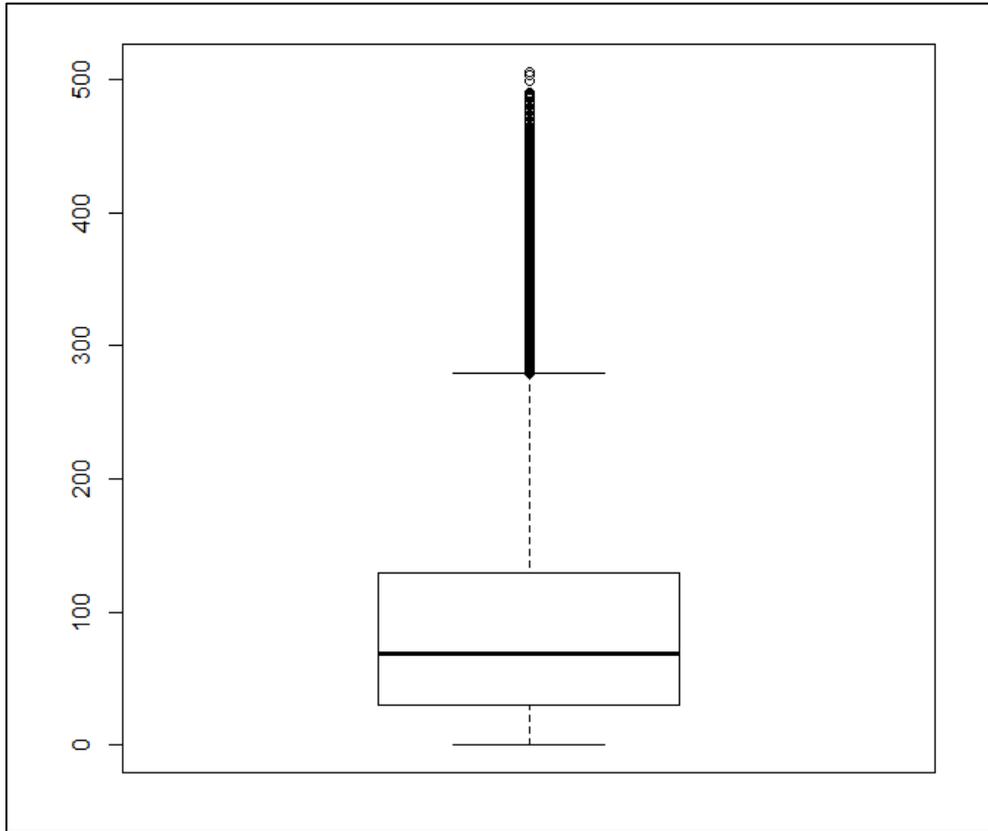


Figure 2-52. Boîte à moustache des réductions de distance

La dernière estimation, qui est présentée à la Figure 2-53, montre la différence entre les distances réduites et celles qui ne le sont pas. Lorsqu'il n'y a pas de réduction de distance, la distance médiane est d'environ 574 mètres, et lorsqu'il y a une réduction de distance, la distance médiane est de 414 mètres après réduction. Cela signifie qu'avant les réductions de distance, la distance médiane pour les paires où une réduction a été observée était d'environ 482 mètres ($414 + 68$), ce qui est beaucoup plus court (près de 100 mètres) que la distance médiane des paires où aucune réduction n'a été observée.

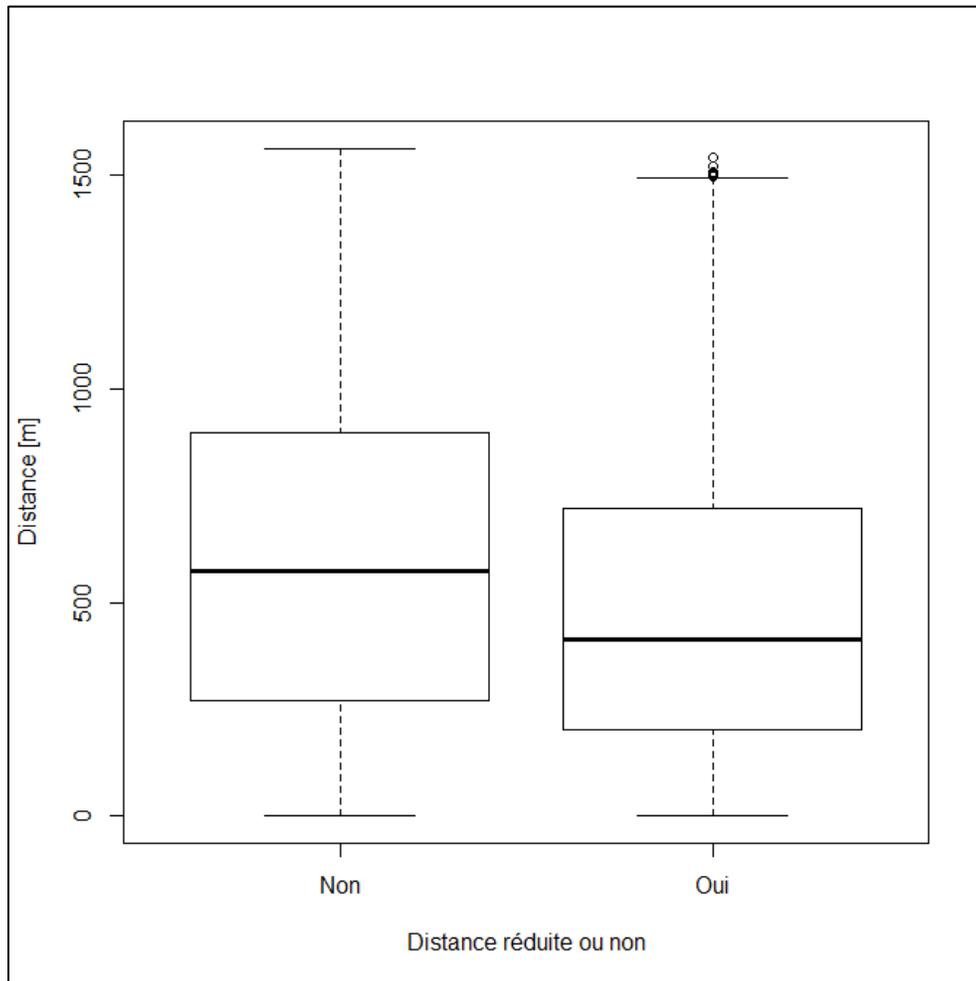


Figure 2-53. Boîtes à moustache des distances réduites ou non

Une des raisons pour laquelle il est possible que certaines paires n'aient pas vu une réduction de distance de trajet est que pour certaines paires de commerces, il est possible que le réseau intérieur ne soit pas plus rapide que le réseau extérieur qui utilise les trottoirs aux abords des rues. Par exemple, en voulant se déplacer entre le Complexe Desjardins (#1 sur la Figure 2-51) et la Place Ville-Marie (#7 sur la Figure 2-51), il est clairement possible de se déplacer plus rapidement sur le réseau extérieur que sur le réseau intérieur entre deux paires de commerces localisés à l'intérieur de ces deux bâtiments.

2.9.6 Conclusion

Dans ce projet, les données d'OpenStreetMap ont été utilisées comme point de départ afin de codifier le réseau intérieur de la ville de Montréal. Premièrement, une norme a été développée afin de créer des liens verticaux. Cette norme a permis l'intégration d'escaliers, d'ascenseurs et d'escaliers roulants dans un graphe permettant de calculer des chemins à la marche entre des niveaux de différents bâtiments.

Les prochaines étapes seraient de faire une validation des coûts associés aux liens verticaux, par exemple en collectant des données sur le terrain dans le réseau intérieur de Montréal. De plus, il a été supposé ici qu'il n'y a aucune différence entre parcourir une distance à l'intérieur ou à l'extérieur. Certains éléments comme les conditions météorologiques pourraient avoir un impact

sur la pénibilité associée à une sortie à l'extérieur. Finalement, l'étude de cas qui a été faite ici dans le réseau intérieur du centre-ville de Montréal pourrait être élargie à un réseau encore plus étendu, par exemple un réseau de transport en commun métropolitain comme celui de Montréal ou d'autres villes. Les travaux qui sont présentés ici pourraient ainsi être utilisés afin de créer un calculateur de chemin intermodal.

2.10 Efficacité globale des choix résidentiels

- Par : Hubert Verreault, ing., associé de recherche
- Contexte : Chaire Mobilité

2.10.1 Introduction

Les stratégies mises de l'avant par les organisations de transport visent habituellement des modifications (principalement des augmentations) des offres de transports afin de favoriser un transfert modal. Il est moins commun que des stratégies visant des changements structuraux de la demande en transport soient mises en place. Ces changements structuraux peuvent être définis comme étant des modifications dans la structure spatio-temporelle des déplacements. Parmi ces changements structuraux, le choix de localisation résidentielle est un facteur clef dans les changements de comportements de mobilité. Il est malgré tout plus rare que des stratégies encourageant les ménages à mieux choisir leur localisation résidentielle soient implantées.

2.10.2 Objectifs

Ce projet vise à évaluer l'efficacité de nos choix de localisations résidentielles en estimant le potentiel gain collectif d'une allocation optimale des logements aux ménages. Il vise également à estimer l'efficacité de la distribution actuelle des logements aux ménages, en prenant en considération les principaux besoins de déplacements des ménages.

2.10.3 Revue de la littérature

Les liens entre le choix de localisation résidentielle et les comportements de mobilité sont étudiés depuis plusieurs années. Ce choix complexe inclut plusieurs facteurs comportant différentes dimensions (logement, voisinage, transport) pour l'ensemble des membres d'un ménage (Moeckel, 2016, Sinniah et al., 2016, Geoghegan, 2002). De plus, les ménages cherchant un nouveau logement priorisent leurs préférences à un moment précis (Moeckel, 2016). Ces préférences peuvent cependant changer dans le temps.

Plusieurs auteurs se concentrent sur l'autosélection résidentielle, où le choix de l'emplacement du ménage est basé principalement sur les préférences de modes utilisés pour se déplacer (Sinniah et al., 2016). Ettema et Nieuwenhuis (2017) supposent que les préférences par rapport aux modes de transport sont des facteurs importants dans le processus de choix de l'emplacement résidentiel et que l'emplacement du ménage n'est pas vraiment limité par d'autres facteurs.

Cependant, l'importance de l'autosélection résidentielle est questionnée par plusieurs autres auteurs. Les comportements de mobilité des membres d'un ménage ne seraient qu'un des facteurs expliquant le choix de localisation résidentielle (Manaugh et El-Geneidy, 2015). Lin et al. (2017) ont démontré que l'environnement bâti a également un impact important sur le choix de localisation. En étudiant le choix de localisation, Zondag (2005) illustre cependant que l'importance de l'accessibilité est petite relativement à celles de la démographie, du voisinage et des caractéristiques des logements disponibles.

Plusieurs auteurs se sont intéressés aux facteurs explicatifs des choix de localisation résidentielle. Moeckel (2016) identifie certaines contraintes dans le choix du domicile comme les caractéristiques du logement, le prix d'achat ou de location, le revenu du ménage et la part dédiée au transport et finalement, le temps de transport vers le travail. Hunt (2010), à partir d'un sondage visant la Ville d'Edmonton, souligne que le type de logement, le bruit causé par la circulation automobile, les taxes municipales, la qualité de l'air et la pollution, le temps de marche vers l'école

et le travail sont tous des facteurs importants ayant une influence sur le choix de localisation résidentielle. De plus, il conclut que les coûts de transport vers les lieux de magasinage et de loisir ne sont pas des facteurs importants en ce sens. Hensher (2001) a démontré que les ménages avec des caractéristiques spécifiques comme des revenus plus élevés, un ou plusieurs enfants ou la présence de deux travailleurs dans le ménage ont des comportements spécifiques dans le choix de localisation.

Bien entendu, l'importance de plusieurs des facteurs mentionnés précédemment en plus de la composition des ménages vont évoluer à travers le temps. Par exemple, plusieurs études ont démontré l'importance du cycle de vie de la famille dans la probabilité de déménager (Clark, 2013, Rabe et Taylor, 2010, Wilkens et al., 2010). Dans le contexte où la modélisation du choix de localisation résidentielle utilise souvent des modèles visant à maximiser l'utilité du ménage, identifier et considérer l'ensemble des facteurs explicatifs est important. Ces recherches sont en cours depuis plusieurs années (McFadden, 1978) et continuent encore aujourd'hui avec des travaux plus récents (Kockelman et al., 2008, Nurlaela et Curtis, 2012, Lee et Waddell, 2010, Bhat et Guo, 2007, Ibeasa et al., 2013). Cependant, peu d'études portent sur les stratégies qui influencent le choix de localisation résidentielle et par les impacts de ces choix. La modélisation intégrée, qui inclut normalement un module couvrant la localisation résidentielle des ménages, permet cependant d'évaluer ces éléments. Acheampong et Silva (2015) ont proposé une revue de littérature complète sur le sujet.

2.10.4 Méthodologie

Cette étude se base principalement sur les données de l'enquête OD 2013 de la région de Montréal. Tous les ménages échantillonnés sur le territoire sont utilisés dans la méthodologie. La méthodologie générale consiste à examiner la relocalisation résidentielle des ménages au niveau de la région dans le but de minimiser les distances totales entre les domiciles et les lieux de travail et d'étude de la population. Ces lieux sont considérés comme des destinations contraintes, ce qui signifie que les activités s'y tenant ne peuvent en théorie s'effectuer à une autre localisation. Le processus proposé inclut différentes étapes méthodologiques à partir des données de l'enquête OD :

1. Assigner un type de ménage à chaque ménage;
2. Pour chaque type de ménage:
 - a) Extraire les logements disponibles;
 - b) Extraire les lieux de travail (LT) et d'étude (LE) pour chacun des membres des ménages;
 - c) Estimer les distances euclidiennes entre l'ensemble des lieux de travail et d'étude pour chaque logement disponible;
 - d) Assigner un logement à chaque ménage qui permet de minimiser les distances totales entre les lieux de travail et d'étude et le logement
3. Estimer les impacts de l'optimisation de la localisation résidentielle.

L'objectif final est d'obtenir la localisation résidentielle optimale pour chaque ménage de l'enquête OD afin de minimiser les distances totales de l'ensemble de la population vers leurs lieux contraints.

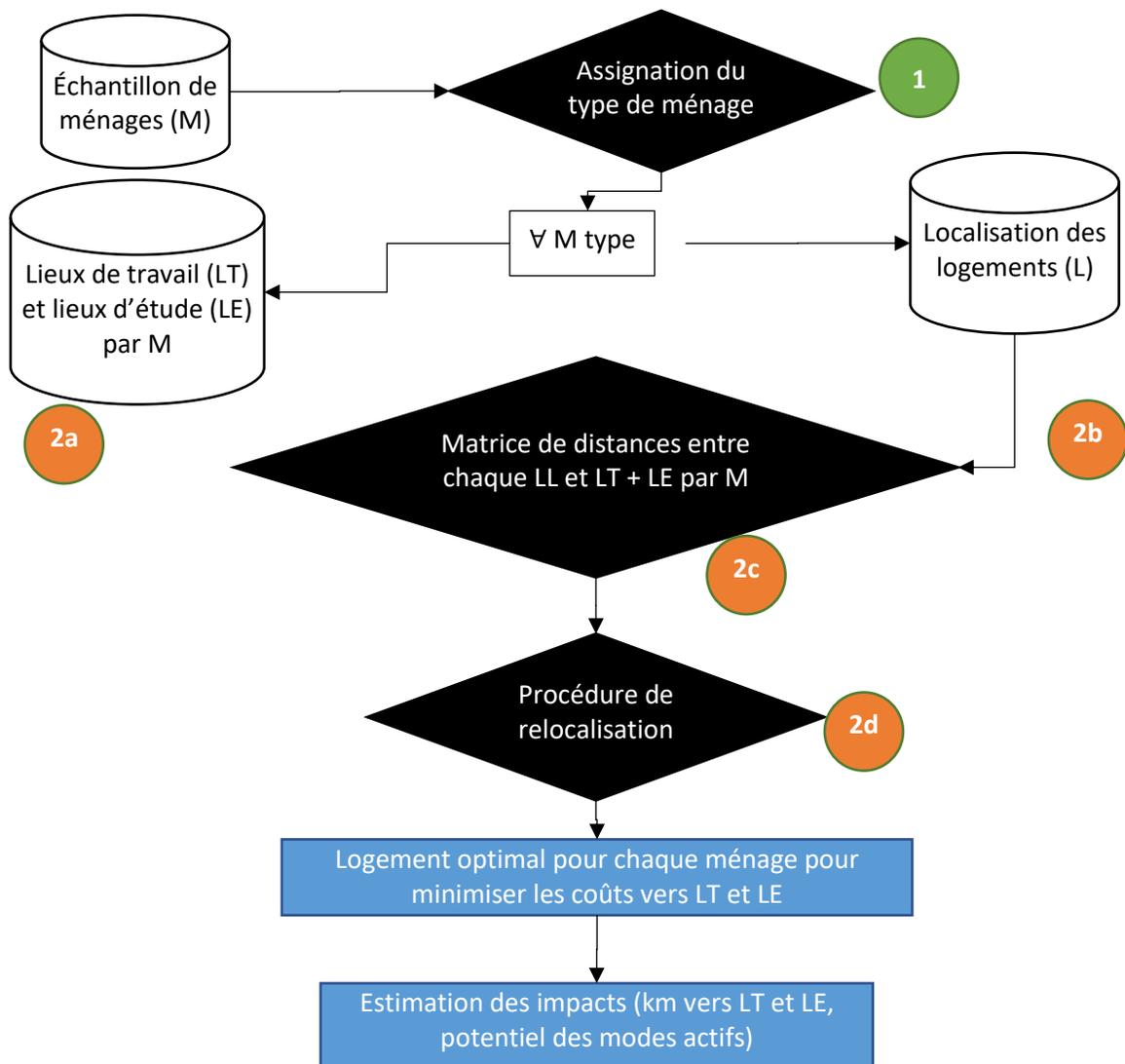


Figure 2-54 Schéma méthodologique global

2.10.4.1 Typologie de ménage

Le processus de relocalisation des ménages demande de classer les ménages selon une typologie afin de s'assurer que le logement qui va être assigné à un ménage sera adéquat. Selon la méthodologie présentée précédemment, un ménage peut seulement être associé à un logement qui hébergeait un ménage du même type précédemment. Il est donc supposé que si un ménage habite dans un logement, ce logement pourrait combler les besoins de n'importe quel ménage du même type. Il est également supposé que chaque ménage a les mêmes capacités financières et que les coûts d'acquisition ou de location d'un logement ne sont pas considérés.

La typologie de ménage utilisée dans cette étude a été développée par Fabre (25). Cette typologie décompose les ménages de l'enquête OD en 8 types distincts à partir de variables caractérisant les ménages et les membres de ceux-ci (taille du ménage, âge moyen du ménage, nombre d'enfants, nombre de personnes âgées de 75 ans et plus). Le Tableau 2-18 présente les 8 types de ménages incluant certains indicateurs permettant de caractériser chacun de ces types.

Tableau 2-18 Typologie de ménage appliquée aux données de l'enquête OD 2013

ID	Type de ménages	% de l'échantillon	Taille moyenne	Moyenne au niveau du ménage		
				Âge moyen du ménage	Nombre d'enfants de moins de 12 ans	Nombre de personnes de 75 ans et plus
1	Jeunes colocataires et couples, célibataires	8.7%	1.9	30.8	0.0	0.0
2	Cinquantennaires	15.9%	1.8	54.8	0.0	0.0
3	Retraités	12.9%	1.7	72.6	0.0	0.8
4	Jeunes familles	3.7%	4.2	23.0	1.5	0.0
5	Familles	15.2%	3.5	36.8	0.1	0.0
6	Très jeunes familles	19.4%	4.0	21.6	1.4	0.0
7	Adultes et personnes âgées	21.9%	2.8	57.5	0.0	0.2
8	Familles multigénérationnelles	2.4%	4.5	39.4	0.8	0.2

2.10.4.2 Logements

La relocalisation d'un ménage est uniquement possible aux localisations actuelles déclarées dans l'enquête OD. Les logements disponibles correspondent donc aux localisations actuelles des ménages dans l'échantillon. De plus, un seul ménage peut être assigné à chaque logement.

2.10.4.3 Lieux d'activités contraints

Dans la fonction objective, la variable représentant le coût inclut seulement les distances entre les domiciles et les lieux d'activités contraints des membres du ménage (lieux de travail et d'étude). L'objectif est de considérer seulement les lieux qui sont visités fréquemment pendant la semaine et qui peuvent difficilement être relocalisés à un autre endroit. Par exemple, il est possible de faire du magasinage ou d'aller au cinéma à d'autres endroits équivalents, peu importe le lieu de domicile. Cependant, changer de lieux d'emplois ou d'étude est plus difficile et ne dépend pas seulement des préférences du membre du ménage. Il est supposé également que les lieux de travail et d'étude restent fixes après le processus de relocalisation.

2.10.4.4 Estimation des distances

Comme mentionné précédemment, la fonction de coût inclut la somme des distances euclidiennes entre les lieux de travail et d'étude d'un ménage et l'ensemble des logements disponibles pour un type de ménage. Les distances euclidiennes sont utilisées plutôt que les distances réseaux à cette étape parce qu'elles sont plus rapides à estimer. Plus de 1,7 milliard de distances ont été estimées.

2.10.4.5 Processus de relocalisation

La procédure de relocalisation des ménages peut être formulée comme un problème conventionnel de transport. L'objectif est de minimiser les coûts de transport entre les lieux de domiciles et les activités contraintes en modifiant le logement associé aux ménages. Cette

procédure est répétée pour chaque type de ménage. La fonction objective peut être définie comme suit :

$$\min \sum_{m \in M, l \in L} C(m, l) X(m, l) \quad (1)$$

Où :

- M est un vecteur contenant les localisations actuelles des ménages.
- L est un vecteur contenant les localisations plausibles pour chaque ménage. Ce vecteur est identique à M.
- C est la matrice de coûts contenant les distances totales pour chaque logement et les lieux contraints de chaque ménage.
- X est la matrice contenant les déménagements nécessaires afin de minimiser les coûts.

Les ménages qui n'ont pas de lieux de travail ou d'étude ont un coût de 0 km dans la fonction de coût, peu importe le logement associé. Ces ménages n'ont donc pas d'impact sur le coût total de transport.

Plusieurs contraintes doivent être appliquées au problème afin de trouver une solution mathématique réaliste. Premièrement, la matrice X doit contenir des entiers supérieurs ou égaux à 0. Également, un ménage doit posséder un seul logement et un logement doit contenir un seul ménage. Ces contraintes sont définies ici :

$$X(m, l) \geq 0 \quad \forall m \in M, l \in L$$

$$X(m, l) \in Z^+ \quad \forall m \in M, l \in L$$

$$\sum_{m \in M} X(m, l) = 1 \quad \forall m \in M$$

$$\sum_{l \in L} X(m, l) = 1 \quad \forall l \in L$$

À la fin de la procédure d'optimisation, la localisation résidentielle de chaque ménage est obtenue pour minimiser les distances totales vers les lieux contraints. Le Package Python Pulp a été utilisé afin de préparer les données et faire l'optimisation du problème de transport (<https://pypi.org/project/PuLP/>). Le solveur utilisé dans le cadre de cette étude est le CBC (<https://github.com/coin-or/Cbc>).

La méthodologie proposée se base sur différentes hypothèses :

- Les logements utilisés par les ménages d'un type répondent à l'ensemble des besoins des ménages du même type.
- La demande en transport relative au travail et à l'étude demeure constante.
- Il n'y a pas de barrière à la relocalisation d'un ménage (coût de déménagement, coût de location ou d'acquisition, etc.).
- Tous les ménages du même type ont la même capacité financière.

Bien que la dernière hypothèse soit loin d'être vraie, elle permet néanmoins d'estimer le potentiel de réduction des distances en négligeant la capacité financière des ménages. Il est important de rappeler qu'un des objectifs principaux de cette étude est d'obtenir la limite supérieure de la réduction du kilométrage afin de servir comme base de référence dans l'évaluation de différentes stratégies plus réalistes. Bien entendu, plusieurs autres facteurs ont une influence sur le choix de localisation résidentielle. Bien qu'ils ne soient pas inclus dans cette étude, ces facteurs expliquent en partie les raisons pour lesquelles le potentiel n'est pas atteint. De plus, ces facteurs peuvent également donner des indices sur les stratégies ayant le potentiel d'encourager la localisation à proximité des lieux contraints d'activités.

2.10.4.6 Estimation des impacts

Après la procédure de relocalisation, la localisation optimale de chaque ménage est obtenue. À partir de ces résultats, les distances réseau entre le nouveau domicile et les lieux contraints de travail et d'étude de chaque ménage sont estimées. Ces distances sont utilisées afin d'estimer le potentiel de réduction du kilométrage à une échelle régionale. Il est cependant plus difficile de déterminer l'impact de la réduction des distances sur les modes utilisés. L'augmentation ou la réduction des distances de déplacements ont une influence sur le choix modal. De plus, la motorisation du ménage peut changer selon la nouvelle localisation de celui-ci. Dans ce contexte, les impacts de la relocalisation des ménages sur les modes utilisés sont étudiés en comparant le potentiel des modes actifs (déplacements latents) avant et après la relocalisation des ménages. Cette procédure est décomposée en plusieurs étapes illustrées à la Figure 2-55.

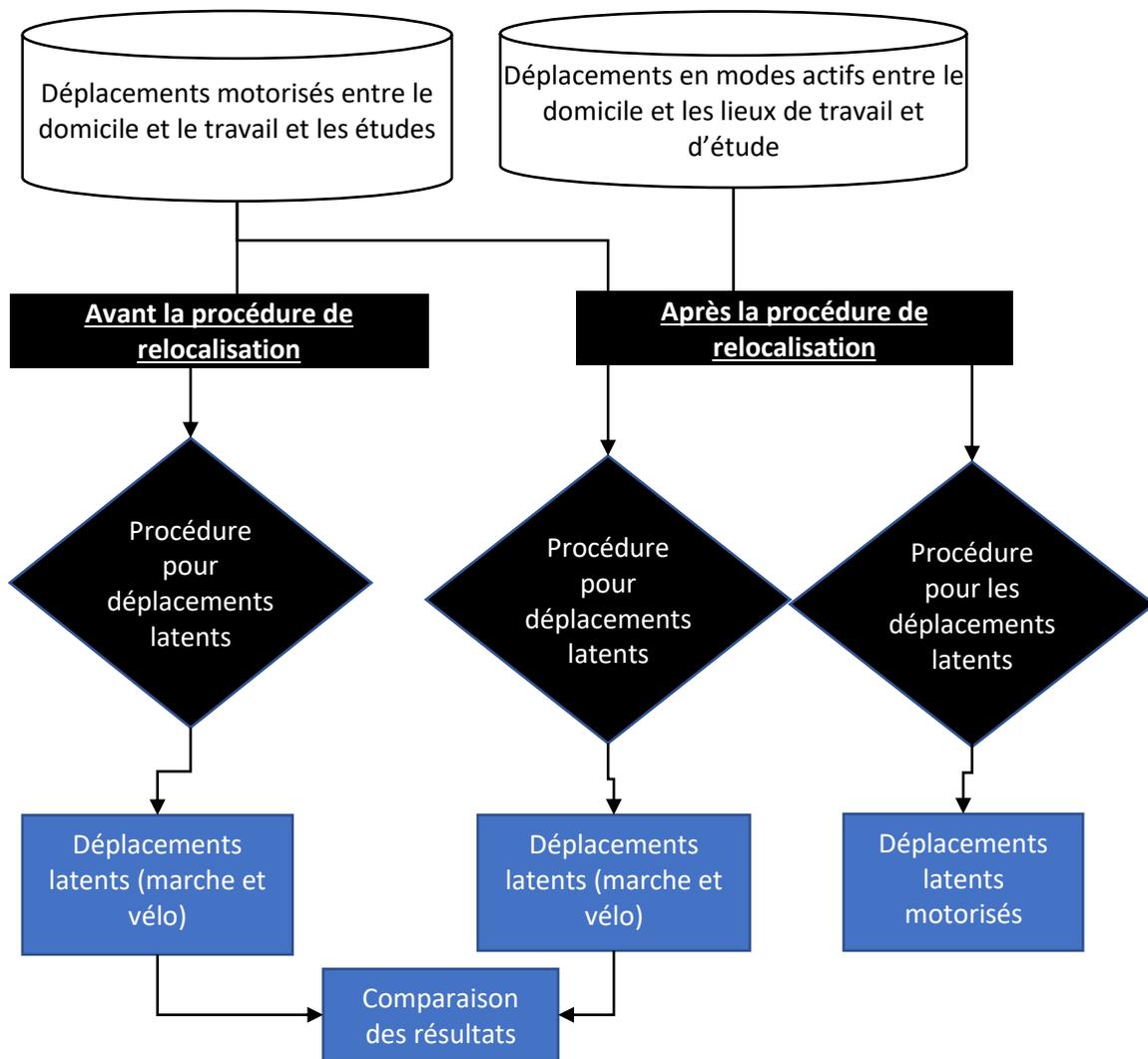


Figure 2-55 Procédure de comparaison des déplacements latents

Déplacements latents à la marche et à vélo

Les déplacements latents pour la marche et le vélo sont estimés selon la méthodologie développée par Morency et al. (2019). Ces travaux reposaient également sur les travaux de Morency et al. (2009), Morency et al. (2007), Godefroy et Morency (2012) et Morency et al. (2014). Cette méthodologie permet d'estimer le nombre total de déplacements latents à la marche et à vélo en appliquant une série de filtres sur les déplacements motorisés, incluant des filtres sur les distances seuils, les chaînes de déplacement et l'âge, afin de déterminer quels déplacements pourraient être effectués à la marche ou à vélo. Les distances seuils de la marche utilisées dans cette étude varient de 761 m à 1 664 m pour les hommes et de 835 m à 1 564 m pour les femmes. Pour celles à vélo, elles varient de 1 662 m à 7 190 m pour les hommes et de 1 790 m à 6 302 m pour les femmes.

Déplacements latents motorisés

Bien que l'objectif de la relocalisation des ménages soit de réduire les distances, la distance peut augmenter pour certains déplacements. Dans ce contexte, certains déplacements qui étaient initialement effectués avec un mode actif pourraient finalement être effectués avec un mode motorisé. Les déplacements latents motorisés sont donc des déplacements initialement effectués

avec un mode actif dont la distance dépasse maintenant les distances seuils de la marche et du vélo.

2.10.5 Résultats

Plusieurs analyses peuvent être présentées à la suite des résultats de relocalisation obtenus. À la suite de la procédure, la grande majorité des ménages ont été relocalisés. Seulement 1,8% des ménages sont demeurés dans le même logement. En examinant les ménages qui ont été relocalisés, 11,5% ont finalement subi une augmentation des distances parcourues pour le travail et l'étude. Cette augmentation est de 8,4 km en moyenne, incluant les déplacements retour au domicile. De l'autre côté, 48,6% des ménages réduisent leurs distances pour une diminution moyenne de 29,2 km par ménage. Finalement, 38,0% des ménages ne visitent pas de lieux contraints pour le travail et l'étude. Ils n'ont donc aucun impact sur le kilométrage régional estimé ici. Ces ménages sont donc des donneurs parfaits de logements, car ils peuvent être relocalisés n'importe où sur le territoire sans avoir d'impact sur la valeur à minimiser. Ces ménages ont été relocalisés en moyenne à 31,5 km de leur domicile initial.

La Figure 2-56 illustre la distribution cumulative des ménages selon la distance entre leur domicile initial et celui après la procédure de relocalisation. 47,1 % des relocalisations sont à moins de 10 km du domicile initial. Les ménages dont les distances de transport augmentent sont habituellement relocalisés relativement proche, soit moins de 10 km (80,0%). Les ménages dont les distances diminuent ont une distribution plus étalée, 63,2% en dessous de 10 km et 32,1% entre 10 et 20 km. Cependant, les ménages relocalisés entre 10 et 20 km de leur domicile initial ont le plus grand impact sur la réduction du kilométrage global (54,6%).

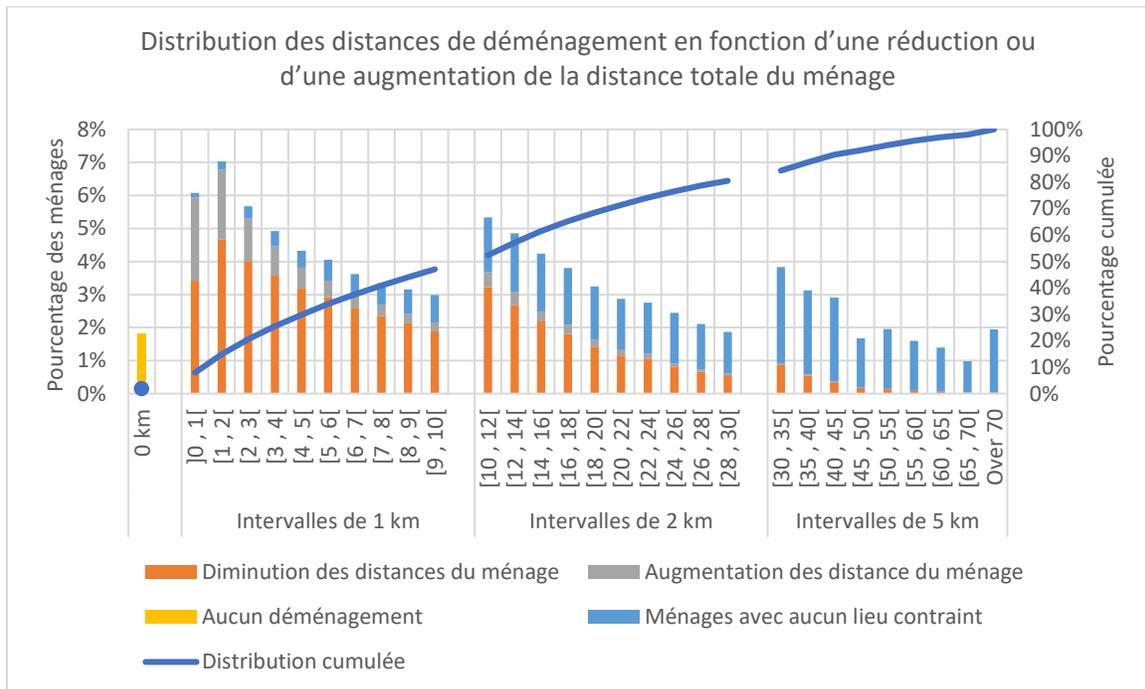


Figure 2-56 Distribution des distances de relocalisation des ménages en fonction d'une réduction ou d'une augmentation de la distance totale de déplacements pour motif contraint du ménage

Les ménages sans lieu contraint visité sont ceux qui sont relocalisés les plus loin de leur domicile initial. Bien que ces ménages n'aient pas de lieux de travail ou d'étude, ils sont caractérisés par des besoins spécifiques. 70,8% de ces ménages sont du type 3 ou 7 qui correspondent aux

personnes âgées et retraitées. Bien que l'accès aux lieux d'étude et de travail soit moins important pour ces ménages, ils ont des besoins grandissants pour certains types d'activités comme les services de santé, qui sont habituellement concentrés dans les centres urbains. Par exemple, pour ces ménages, la distance moyenne vers l'hôpital le plus proche a augmenté de 6,5 km à 8,1 km.

Globalement, la relocalisation des ménages a réduit les distances pour le travail et l'étude de 37,9%. Cette réduction permet de réduire les distances de chaque ménage de 13,8 km en moyenne. La Figure 2-57 illustre la distribution des distances pour l'étude et le travail avant et après la procédure de relocalisation des ménages. En moyenne, la distance moyenne de ces déplacements a diminué de 4,9 km.

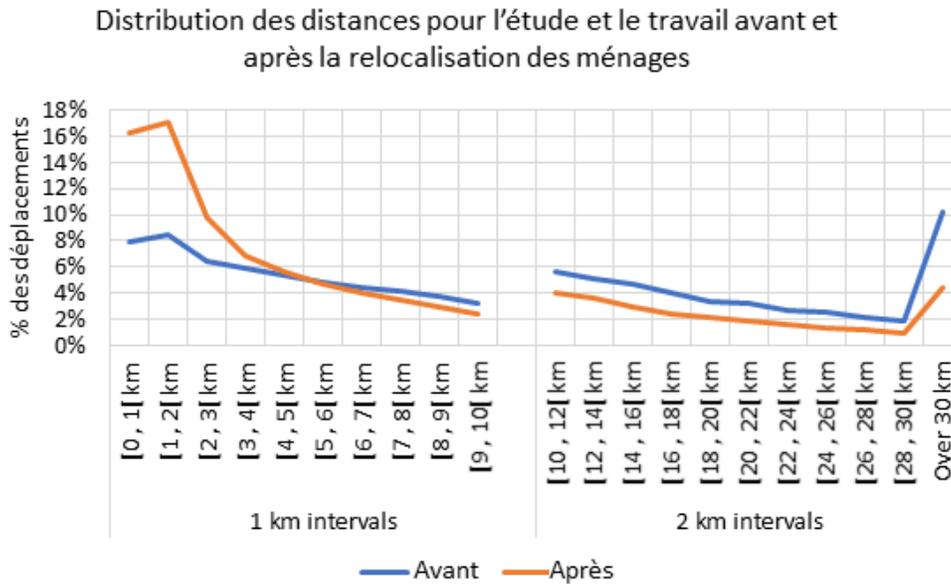


Figure 2-57 Distribution des distances pour l'étude et le travail avant et après la relocalisation des ménages

Comme observé dans la Figure 2-57, le nombre de déplacements de moins de 5 km est en augmentation. Ces déplacements passent de 34,0 % à 55,7 % après la relocalisation des ménages. Cette augmentation est encore plus importante pour les déplacements de moins de 2 km avec un pourcentage passant de 34,0 % à 55,7 %. Ces déplacements, dont la distance est souvent inférieure aux distances seuils de la marche ou du vélo, sont ceux qui ont le plus de potentiel de devenir des déplacements latents. À partir de 5 km, le nombre de déplacements est inférieur à la suite de la relocalisation des ménages. Cette diminution est particulièrement importante pour les déplacements de plus de 30 km qui passent de 10,2% à 4,5% de l'ensemble des déplacements.

En supposant que le mode de transport reste constant à la suite de la modification de la distance des déplacements, le kilométrage total diminue de 42,8% pour l'auto-conducteur, de 35,2 % pour l'auto-passager, de 13,3% pour le bus scolaire et de 34,2% pour le transport en commun. Cependant, ces résultats ne considèrent pas le transfert modal, particulièrement celui vers les modes actifs, par suite de la modification des déplacements. Afin de prendre en considération une partie de ce transfert modal, les déplacements latents aux modes actifs ont été estimés avant et après la relocalisation des ménages. Initialement, les déplacements latents à la marche et à vélo comportaient respectivement 2,6% et 26,1% des déplacements motorisés. Après la procédure de relocalisation des ménages, les déplacements latents ont augmenté à 15,5% (marche) et à 39,9% (vélo) des déplacements motorisés. Le Tableau 2-19 présente la comparaison

des pourcentages de déplacements latents avant et après la relocalisation des ménages décomposés en fonction du mode initial utilisé pour le déplacement. Les augmentations de déplacements latents sont particulièrement intéressantes dans le cadre des déplacements auto-conducteurs et bus scolaire. Bien que n'importe toute augmentation des déplacements actifs soit positive, elle est particulièrement intéressante lorsqu'elle s'applique aux enfants.

Tableau 2-19 Comparaison des déplacements latents à la marche et à vélo avant et après la relocalisation des ménages

% des déplacements latents AVANT et APRÈS la relocalisation				
Mode	Marche		Vélo	
	Avant	Après	Avant	Après
Auto-conducteur	2.8%	16.5%	23.6%	39.6%
Auto-passager	7.0%	19.1%	38.0%	42.2%
Bus scolaire	1.7%	12.7%	25.9%	35.4%
Transport en commun	0.8%	13.9%	29.9%	43.3%
Total	2.6%	15.5%	26.1%	39.9%

Au total, 55,4 % des déplacements motorisés pour le travail et l'étude peuvent se faire avec un mode actif après la relocalisation des ménages, ce qui représente 9,2 % du kilométrage motorisé total. Cependant, certains déplacements initialement effectués à la marche et à vélo ont subi une augmentation de leur distance, parfois plus élevée que la distance seuil pour le mode associé. Ces déplacements correspondent à des déplacements latents motorisés et causent une augmentation de 1,6% des distances motorisées. Ce résultat est néanmoins beaucoup plus petit que les gains engendrés.

2.10.6 Conclusion

Cette étude visait à présenter une méthodologie permettant d'estimer le potentiel de réduction du kilométrage des ménages découlant d'une optimisation de la localisation résidentielle des ménages. Ces résultats permettent également d'évaluer l'efficacité des choix actuels de localisations résidentielles dans une perspective de transport. Cette méthodologie possède également l'avantage de pouvoir servir comme valeur de référence pour l'évaluation de différentes stratégies implantées. Par exemple, est-ce que l'ajout d'une nouvelle infrastructure routière a permis de s'approcher de la valeur de référence ou a plutôt contribué à augmenter la distance parcourue par les ménages ?

Les résultats ont montré qu'il serait possible de diminuer significativement les distances parcourues pour le travail et l'étude en encourageant les ménages à se localiser plus proches de leurs lieux de travail et d'étude. En plus d'une réduction des distances, ces relocalisations pourraient engendrer des externalités positives pour la société, comme la réduction des accidents et des GES, en plus de l'augmentation de l'activité physique par la population.

Les résultats obtenus représentent le scénario optimal, scénario impossible à réaliser en pratique. Il serait premièrement difficile de forcer les ménages à déménager et encore plus difficile de

convaincre certains d'entre eux de s'éloigner de leurs lieux de travail et d'étude dans l'objectif de contribuer à la société. Cependant, certaines stratégies pourraient être développées pour aider les ménages à mieux choisir la localisation de leur domicile. De plus, les ménages pourraient également être encouragés à changer leur localisation lorsque leurs lieux contraints se modifient : les ménages dont tous les enfants ont terminé l'école primaire par exemple.

2.10.6.1 Limitations et perspectives

Il y a plusieurs limitations et perspectives dans la méthodologie utilisée dans le cadre de ces travaux. Premièrement, il est supposé que si un ménage d'un certain type habite un logement, l'ensemble des ménages du même type pourrait y habiter. En pratique, les besoins et les préférences des ménages sont plus complexes. La méthodologie se base également sur le concept de lieux contraints d'activités qui sont le travail et l'étude. Cependant, certaines personnes ont plus de lieux contraints. Bien que les activités de type magasinage ou loisir puissent se faire à peu près n'importe où, certains types d'activité comme visiter un ami ou se rendre à un rendez-vous médical peuvent également être considérés comme des activités contraintes et avoir un impact sur le choix de localisation résidentielle; ces activités sont néanmoins typiquement moins fréquentes.

Une autre limitation est, en se basant sur l'enquête OD, que seules les activités contraintes de semaine sont considérées. Également, plusieurs facteurs ne sont pas considérés dans la méthodologie. Premièrement, il est supposé que l'ensemble des ménages ont la même capacité financière et que tous les logements sont abordables pour les ménages d'un même type. Bien entendu, c'est loin d'être le cas en pratique. Cependant, certaines stratégies peuvent aider un ménage à habiter dans un logement ou dans un secteur qui n'est pas abordable pour celui-ci. Les résultats peuvent également donner des indices sur les lieux de construction des futurs logements abordables. De plus, les coûts de déménagements incluant le notaire ou la taxe de Bienvenue ne sont pas considérés. Ces coûts, qui sont loin d'être prohibitifs, peuvent rendre les déménagements de courtes distances moins attractifs. L'estimation des coûts dans la fonction d'optimisation se base sur les distances. Cependant, d'autres aspects pourraient être pris en considération comme les temps de parcours, les coûts ou les émissions de GES. Il serait également possible d'ajouter, dans la fonction, des facteurs de pondération permettant d'accorder plus d'importance à certaines populations comme les enfants.

2.11 Algorithme de génération d'alternatives de trajets de transport collectif

- Par : Pierre-Léo Bourbonnais, ing., associé de recherche
- Contexte : Chaire Mobilité

Au cours de la dernière décennie, un grand nombre d'algorithmes de calcul de chemin de transport collectif ont été proposés et comparés. L'objectif principal de ces algorithmes était de calculer l'itinéraire le plus court le plus rapidement possible. Certains algorithmes généraient des alternatives en calculant l'itinéraire le plus court par nombre de transferts ou l'itinéraire le plus court selon des heures de départ ou d'arrivée différentes. Cependant, il est de plus en plus nécessaire de générer des itinéraires alternatifs qui correspondent mieux aux choix et aux contraintes des divers utilisateurs du transport collectif et qui prennent en compte le coût perçu pour chaque segment d'un trajet de transport collectif. Cela inclut non seulement une valeur différente du temps pour le temps d'accès à l'origine et à destination, les temps d'attente, les temps en véhicule et les temps de transfert avec de possibles pénalités, mais également des poids différents liés à la perception de ces segments, y compris les composantes de confort et d'achalandage, les modes empruntés (bus, tramway, métro, train régional, etc.), la qualité de service (fréquence et adhérence à l'horaire), la disponibilité des informations en temps réel et la flexibilité des heures de départ et d'arrivée.

Dans le but d'améliorer le calculateur de trajet *trRouting* de la plateforme Transition (Bourbonnais et al., 2021), un algorithme pour générer toutes les alternatives d'itinéraires plausibles pour les trajets de transport collectif a été développé. Cette section présentera brièvement l'algorithme de génération d'alternatives pour ensuite comparer les alternatives générées avec les choix d'itinéraires déclarés dans l'enquête Origine-Destination. Une comparaison entre les choix d'itinéraires déclarés et les chemins les plus courts sera effectuée par temps de trajet, groupe d'âge et activité à destination. Enfin, les caractéristiques de chaque alternative seront analysées plus en détail pour proposer des contraintes applicables à la majorité des trajets en transport en commun afin de réduire le nombre de calculs dans l'algorithme et ainsi améliorer ses performances.

2.11.1 Objectifs

Le premier objectif de la recherche est de générer toutes les alternatives possibles associées aux déplacements de transport collectif provenant d'une enquête Origine-Destination. Le deuxième objectif est de faire correspondre les choix d'itinéraires déclarés avec l'une des alternatives générées. Enfin, le troisième et dernier objectif est de sélectionner les contraintes à ajouter à l'algorithme afin d'optimiser ses performances tout en s'assurant que suffisamment d'alternatives soient générées pour correspondre en grande partie aux choix observés. Cela permettra à l'algorithme de ne calculer que les alternatives pertinentes, c'est-à-dire celles qui ont la plus forte probabilité d'être choisies par les usagers du transport en commun.

2.11.2 Contenu

La revue de la littérature débute par un aperçu des algorithmes actuels de calcul de chemin de transport collectif, suivi par un examen des méthodes impliquées dans la génération d'itinéraires alternatifs et se termine par un résumé de la relation entre la génération d'itinéraires alternatifs et la modélisation du choix d'itinéraires. La section sur les données et la méthodologie décrit l'algorithme de calcul de chemin utilisé, l'algorithme de génération d'alternatives proposé et le réseau de transport collectif et les données de déplacements qui ont été impliqués dans le processus de correspondance entre les trajets déclarés et les trajets générés. La section des

résultats présente les résultats du processus de correspondance et compare les itinéraires déclarés avec le chemin le plus court calculé. Enfin, les limites de la méthodologie et les données impliquées sont discutées dans la conclusion, suivie d'une brève description des recherches futures qui pourraient non seulement améliorer l'algorithme proposé, mais également en étendre la portée.

2.11.3 Revue de littérature

2.11.3.1 Algorithmes de calcul de chemin

Les algorithmes de calcul de chemin de transport collectif basés sur les horaires sont plus complexes que les modèles statiques utilisés pour les itinéraires classiques de calcul de chemin pour la marche, le vélo ou la voiture, car l'état du réseau change pendant la traversée du réseau (Bast et al., 2015). Les premières tentatives de calcul d'itinéraires de transport collectif étaient des variantes de l'algorithme de Dijkstra (Dijkstra, 1959) avec des ajouts permettant d'être dépendant du temps (Delling et al., 2012, Geisberger 2009 et Müller-Hannemann et al. 2007). Cependant, de nouveaux algorithmes non entièrement basés sur Dijkstra ont été proposés au cours de la dernière décennie. RAPTOR (Delling et al., 2007), Connection Scan Algorithm (CSA) (Dibbelt et al., 2017), le Trip-Based algorithm (Witt, 2015) sont des algorithmes de calcul de chemin de transport collectif qui optimisent soit le temps de calcul, le temps de prétraitement ou les résultats multicritères (généralement en fonction du nombre de transferts ou de différentes heures de départ ou d'arrivée). Les algorithmes les plus récents tels que Transfer Patterns (Bast et al., 2010), Timetable Contraction Hiérarchies (Geisberger 2009), CSA with lookup tables and transfer patterns (t-CSA) (Prasad et al., 2016), Accelerated CSA (Strasser et Wagner, 2013) et l'hyper-partitionnement (Delling et al., 2017) ont élargi encore plus la boîte à outils de calcul d'itinéraires ces dernières années. Chaque algorithme et technique d'optimisation a été développée pour répondre à des exigences spécifiques telles que minimiser le temps de prétraitement ou le temps de calcul, sachant qu'il est particulièrement difficile de minimiser les deux en même temps.

2.11.3.2 Génération d'alternatives et modélisation du choix d'itinéraires

La plupart des modèles de choix d'itinéraire utilisent un algorithme de génération de chemins simplifié qui ne prend pas en compte les horaires précis. Certains utilisent le chemin le plus court stochastique répété, les k chemins les plus courts ou les méthodes probabilistes (Anderson, 2013). Des techniques plus avancées pour les réseaux de transport collectif impliquent de générer des alternatives basées sur le nombre de transferts, le coût d'utilisation de chaque ligne et l'heure de départ (Friedrich et al., 2011, Hoogendoorn-Lanser et al., 2005). Certaines approches utilisent des données d'enquête ou des données de carte à puce pour créer un ensemble de choix d'itinéraires (Jánošíková et al., 2014), même lorsque les données de transaction à la sortie (« tap-out ») ne sont pas enregistrées (Trépanier et al., 2007). Lorsque les données observées ne sont pas disponibles ou lors de la conception de nouveaux réseaux avec de nouveaux itinéraires et horaires, les planificateurs doivent générer plus d'une alternative pour le même nombre de transferts, le même coût ou la même heure de départ ou d'arrivée. Avec des ensembles de choix d'itinéraire étendus, il est possible de comparer les différentes alternatives avec plusieurs valeurs de temps (Wardman et al., 2016)(temps d'accès à l'origine et à destination, temps de transfert, temps en véhicule et temps d'attente) et des pénalités de transfert, tout en prenant en compte les caractéristiques socio-démographiques de l'utilisateur, le confort et l'achalandage, les retards possibles et la qualité de service (fréquence et mode de transport) (Raveau et al., 2014, Tirachini et al., 2013, Nazem et al., 2018, Haywood et al., 2017, Hong et al., 2017). Cependant, à notre connaissance, les méthodes pour générer toutes les alternatives pertinentes avec uniquement

des données de réseau en entrée et utilisant des algorithmes de calcul de chemin basés sur les horaires n'ont pas encore été définies ou publiées.

2.11.4 Données et méthodologie

2.11.4.1 *Algorithme de calcul de chemin de transport collectif*

L'algorithme de calcul de chemin utilisé pour cette recherche est le *Connection Scan Algorithm* (CSA)(Dibbelt et al., 2017). Cet algorithme est un des plus simples et des plus rapides disponibles à l'heure actuelle. Il ne nécessite pas de long prétraitement, ce qui peut être utile lors de la mise à jour dynamique du réseau à partir de données GPS et opérationnelles en temps réel. L'implémentation choisie comprend une interface dans laquelle il est possible de filtrer les lignes, les modes et les arrêts avant le calcul, ce qui facilite l'intégration de la méthode de génération d'alternatives à l'algorithme principal CSA.

2.11.4.2 *Calculs de chemin piéton et données associées*

Les trajets de marche d'accès et les temps de trajet entre les arrêts lors des transferts ont été calculés avec l'engin de calcul de chemin *Open Source Routing Machine* (OSRM) (Luxen et Vetter, 2011). Les données d'OpenStreetMap pour la région métropolitaine de Montréal ont été importées dans OSRM et incluaient non seulement le réseau routier, mais aussi les ruelles, allées et sentiers pédestres, ainsi que la position des feux de circulation, pour lesquels une pénalité de 20 secondes s'ajoutait au temps de trajet à pied.

2.11.4.3 *Données des réseaux de transport collectif*

La source de données principale de l'algorithme CSA est un tableau de connexions de transport collectif qui sont générées à partir des données GTFS (General Transit Feed Specification) (Google, 2016). Les fichiers GTFS de toutes les agences de la région métropolitaine de Montréal de l'automne 2013 ont été convertis en connexions. La deuxième source de données de l'algorithme CSA est une liste de trajets piétons entre les arrêts, qui comprend tous les temps de trajet à pied entre toutes les paires d'arrêts dont le temps de parcours est de 20 minutes ou moins. Cette limite de 20 minutes permet d'améliorer les performances de l'algorithme tout en demeurant réaliste.

2.11.4.4 *Génération des alternatives*

La méthode de génération d'alternatives est basée sur le filtrage successif des lignes. L'idée générale est de calculer d'abord l'itinéraire le plus rapide (celui avec l'heure d'arrivée la plus rapprochée de l'heure de départ, sans aucune pondération autre que le temps de parcours), puis de supprimer les combinaisons de lignes utilisées dans cet itinéraire le plus rapide. Pour chaque alternative trouvée au premier tour, le même filtrage est répété pour plusieurs tours jusqu'à ce que l'un des trois résultats soit atteint: le temps de parcours total maximum est atteint (paramètre initial), le nombre maximum de combinaisons de lignes a été calculé (paramètre initial pour améliorer les performances), ou toutes les alternatives possibles ont été trouvées.

2.11.4.5 *Définition d'une alternative*

Pour que l'algorithme fonctionne comme prévu, on doit d'abord définir de manière unique ce que représente une alternative. La définition utilisée est qu'une alternative est définie de manière unique par ses lignes, quel que soit l'ordre dans lequel elles sont utilisées ou si l'une est utilisée plusieurs fois. Cela signifie que dans un réseau à 3 lignes (Ligne 1, Ligne 2 et Ligne 3), seules ces combinaisons sont uniques et représentent des alternatives distinctes: [1], [2], [3], [1,2], [1,3], [2,3] et [1,2,3].

Cette définition est suffisante pour l'analyse et la modélisation du choix d'itinéraire, car elle est valable dans la grande majorité des cas. Une exception peut apparaître lorsque des lignes ont des

formes complexes avec un service suffisamment bon pour que le transfert sur une autre ligne et le réembarquement sur la première ligne soient réalisables, ce qui est très rare. Dans tous les cas, seul l'alternative la plus rapide utilisant la même combinaison de lignes est conservée. Par exemple, si la combinaison unique est [1,2] et que l'itinéraire le plus court utilisant ces deux lignes utilise la ligne 2, en transférant à la ligne 1 puis en transférant à nouveau à la ligne 2, la séquence spécifique [2,1,2] sera conservée comme alternative pour la combinaison [1,2], ignorant les autres séquences comme [2,1] ou [1,2,1], qui la plupart du temps ne sont pas réalisables ou augmentent trop la tortuosité du parcours.

2.11.4.6 Combinaisons de lignes

Pour chaque alternative trouvée, un ensemble de combinaisons associées est enregistré pour un filtrage supplémentaire. Par exemple, les combinaisons associées à la séquence de lignes [1,2,3,4] sont les suivantes: [1], [2], [3], [4], [1,2], [1,3], [1,4], [2,3], [2,4], [3,4], [1,2,3], [1,2,4], [1,3,4], [2,3,4] et [1,2,3,4]. Ainsi, si l'itinéraire calculé utilise les lignes 1, 2, 3 et 4, alors l'algorithme calculera les nouveaux itinéraires en utilisant n'importe quelles lignes sauf 1, sauf 2, sauf 3, sauf 4, sauf 1 et 2, sauf 1 et 3 et ainsi de suite. En ce sens, chaque combinaison sera filtrée au moins une fois pour obtenir toutes les alternatives possibles.

2.11.4.7 Algorithme de filtrage de lignes

L'algorithme appelle d'abord le calculateur CSA pour obtenir l'itinéraire avec l'heure d'arrivée la plus rapprochée de l'heure de départ (il peut également travailler en arrière en obtenant l'heure de départ la plus rapprochée pour une heure d'arrivée choisie). Cette alternative la plus rapide est ajoutée à l'ensemble d'alternatives A et les combinaisons associées sont ajoutées à la liste de toutes les combinaisons C.

La boucle principale calcule les alternatives en filtrant les lignes de chaque combinaison et ajoute les nouvelles combinaisons associées à l'itinéraire calculé à C jusqu'à ce que toutes les combinaisons dans C aient été filtrées ou jusqu'à ce que le nombre maximum d'alternatives ait été calculé.

Lorsqu'une nouvelle combinaison est ajoutée à C, les lignes filtrées pour obtenir l'alternative actuelle sont fusionnées avec cette nouvelle combinaison. Cette optimisation est rendue possible par le fait qu'autoriser à nouveau les lignes déjà filtrées dans l'une de ses combinaisons associées ne renverrait jamais un résultat avec un temps de parcours inférieur à l'alternative actuelle. Par exemple, si l'alternative la plus rapide n'utilise que la ligne 1, alors la combinaison associée sera [1]. Si en filtrant la ligne 1, l'algorithme CSA renvoie une nouvelle alternative avec les lignes 2 et 3, alors les combinaisons associées seraient donc [2], [3] et [2,3]. Cependant, filtrer uniquement l'itinéraire 2 dans le calcul d'itinéraire suivant renverrait le premier itinéraire le plus court en utilisant la ligne 1, ce qui n'est pas une nouvelle alternative. Pour cette raison, la première combinaison est fusionnée avec les nouvelles combinaisons associées et elles deviennent [1,2], [1,3] et [1,2,3]. La Figure 2-58 illustre le processus de filtrage pour un trajet spécifique. Le lecteur perspicace peut voir que l'algorithme peut être optimisé en ne calculant pas certaines combinaisons de filtrage de lignes. Par exemple, la troisième combinaison de lignes filtrées pour la variante 2 ne devrait jamais être calculée puisque les lignes de la variante 8 n'incluent pas la ligne 55. Filtrer la ligne 55 ne produirait jamais une alternative différente. Cette optimisation est incluse dans l'algorithme implémenté, mais a été omise dans le pseudo-code de l'algorithme (Figure 2-59) pour en améliorer la clarté.

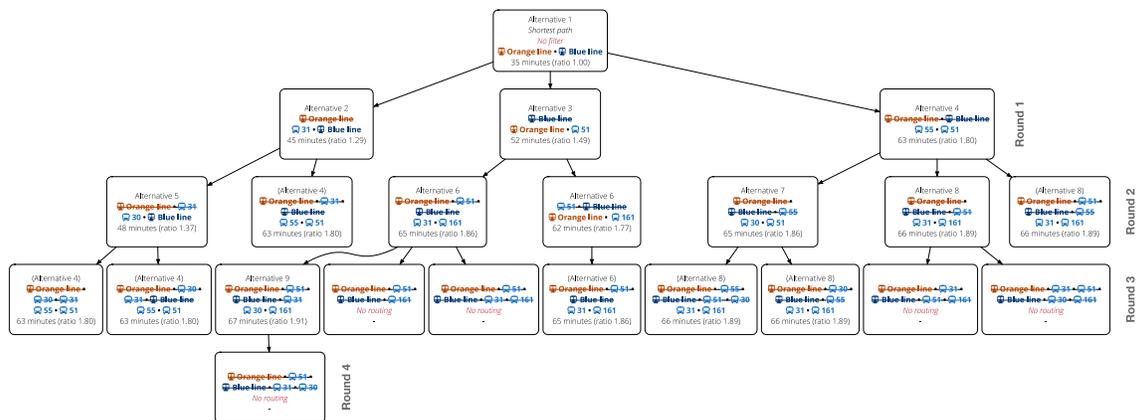


Figure 2-58 Exemple de filtrage dans l'algorithme de génération d'alternatives

Il est important de noter que l'algorithme n'est pas optimisé pour la performance à cette étape. Le premier objectif est d'obtenir toutes les alternatives possibles. Dans un second temps, les alternatives sont comparées aux données de choix d'itinéraire issues de l'enquête Origine-Destination pour sélectionner les contraintes qui permettraient à l'algorithme de se terminer plus tôt tout en respectant la grande majorité des itinéraires déclarés et observés.

```

Paramètres
imax /* le nombre maximal de trajets à calculer, par défaut: ∞ */
tdep /* l'heure de départ */
o, d /* les localisations de l'origine et de la destination */
Initialization
Cf ← ∅ /* combinaisons déjà filtrées */
C ← ∅ /* toutes les combinaisons */
A ← ∅ /* ensemble des alternatives */
i ← 1

r ← CSA(tdep, o, d, c = ∅) /* lancer CSA sans filtre de lignes c. On
obtient ainsi le trajet le plus rapide en temps (le trajet avec
l'heure d'arrivée la plus proche de l'heure de départ). */
A ← A ∪ r /* ajouter le trajet le plus rapide à l'ensemble des
alternatives */
Cr ← combinaisons(r) /* obtenir les combinaisons de lignes associées
au trajet le plus rapide r */
foreach cr in Cr do
    if cr ∉ Cf then
        | C ← C ∪ cr /* ajouter la nouvelle combinaison */
    end
end
while C ≠ ∅ do
    | c ← C[0]
    | C ← C \ C[0] /* déplacer C pour obtenir c */
    | r ← CSA(tdep, o, d, c) /* lancer CSA avec le filtre de lignes c. Cela
veut dire que le trajet obtenu peut utiliser n'importe quelle
ligne sauf celles dans c. r.routable retourne vrai si un trajet
est trouvé */
    | Cf ← Cf ∪ c /* ajouter la combinaison à celles déjà filtrées */
    | if r.routable ∧ r ∉ A then
        | | A ← A ∪ r /* ajouter le trajet obtenu à l'ensemble des
alternatives */
        | | Cr ← combinaisons(r) /* obtenir les combiansions associées à
l'alternative r */
        | | foreach cr in Cr do
            | | | if cr ∉ Cf then
                | | | | C ← C ∪ (cr + c) /* ajouter la nouvelle combinaison cr
fusionnée à la combinaison actuelle c */
            | | | end
        | | end
    | end
    | if i = imax then
        | | C ← ∅ /* va arrêter le calcul si le nombre de trajets maximal
calculé a été atteint */
    | end
    | i ← i + 1
end
end

```

Figure 2-59 Algorithme de filtrage de lignes pour la génération d'alternatives

2.11.4.8 Données utilisées pour le choix d'itinéraires

Les données sur les choix d'itinéraires ont été extraites de l'enquête Origine-Destination de Montréal 2013 et comprenaient l'heure de départ, l'origine, la destination, ainsi que les lignes utilisées pour chaque trajet de transport collectif, telles que déclarées par les répondants.

Le nombre de trajets de transport collectif valides déclarés dans l'enquête régionale est de 49 997, ce qui diminue à 49 370 après avoir retiré les trajets qui utilisent des lignes scolaires dédiées ou des lignes spéciales qui ne sont pas incluses dans les fichiers GTFS.

2.11.4.9 Alternatives correspondant aux choix d'itinéraire déclarés

La plateforme Transition a été utilisée pour intégrer le calculateur de chemins pour la marche (OSRM), le calculateur de chemins de transport collectif (CSA / trRouting) et les données de déplacements Origine-Destination. Chaque trajet déclaré est envoyé à l'algorithme de filtrage des lignes pour générer toutes les alternatives possibles sans aucune contrainte. Les alternatives obtenues sont ensuite comparées aux choix d'itinéraire déclarés et les alternatives correspondantes sont enregistrées pour une analyse plus approfondie.

2.11.4.10 Définition d'une alternative correspondante

Pour obtenir une correspondance entre une alternative calculée et un choix d'itinéraire déclaré, les lignes utilisées et le nombre de transferts doivent être les mêmes, mais la séquence des lignes peut différer comme expliqué précédemment.

2.11.5 Résultats

2.11.5.1 Comparaison d'alternatives calculées avec des choix d'itinéraire déclarés

Les trajets de transport collectif déclarés ont été analysés sous différents angles, y compris les comparaisons des temps de trajet, du nombre de transferts, ainsi que des temps de marche. Les comparaisons ont été réalisées non seulement en fonction du temps de trajet de l'alternative la plus rapide, mais également par tranche d'âge et par activité à destination. Les différences de modes (bus, métro, train) entre les itinéraires déclarés et les alternatives les plus rapides ont également été brièvement comparées.

La Figure 2-60 comprend la distribution des itinéraires déclarés pour chaque plage de temps de parcours de l'alternative la plus rapide. 95% des alternatives les plus rapides calculées ont un temps de trajet compris entre 15 et 90 minutes, ce qui est typique d'une grande région métropolitaine.

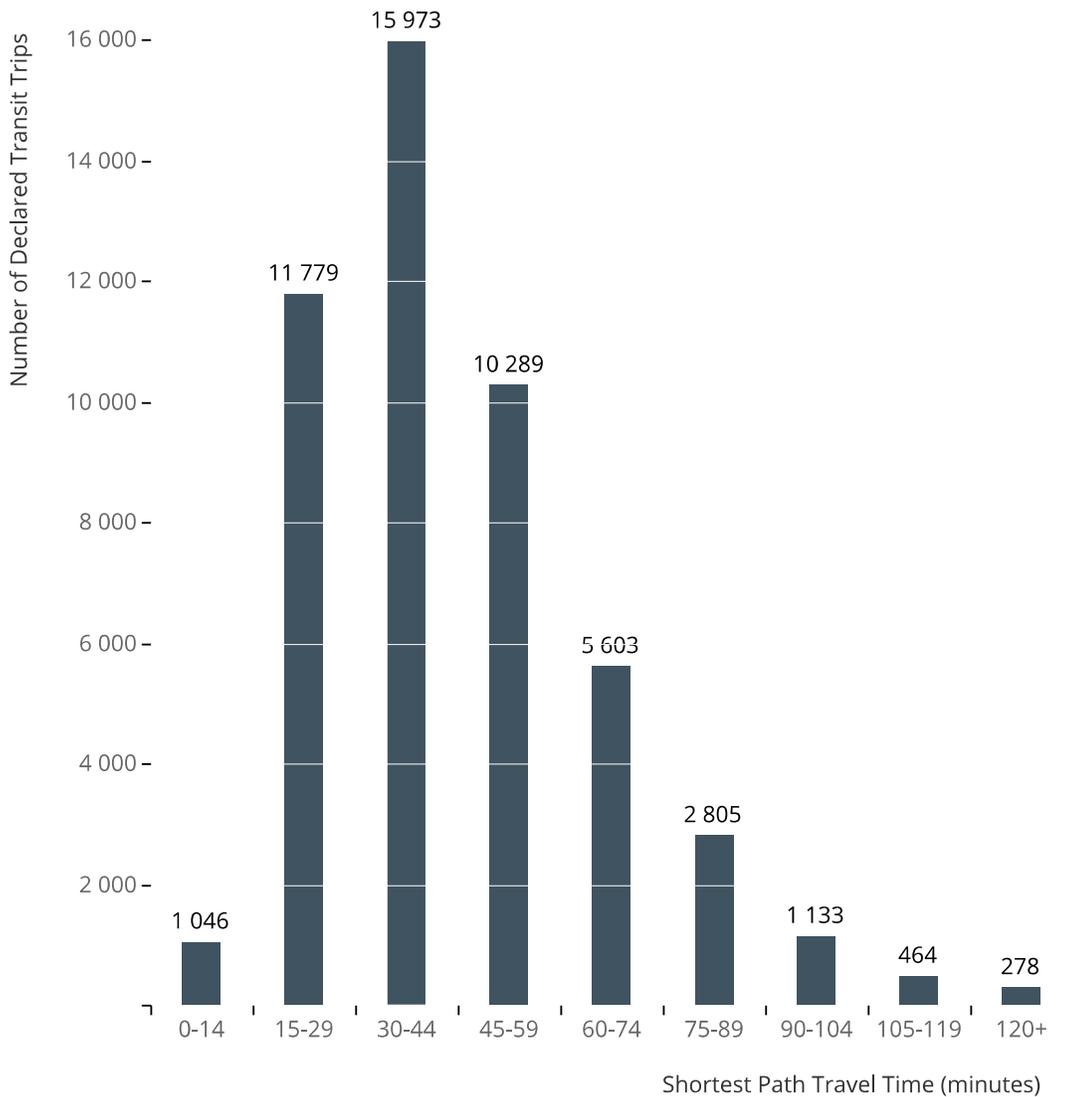


Figure 2-60 Distribution du nombre d'itinéraires déclarés en fonction du temps de parcours du trajet le plus rapide

On observe d'abord que 54% des itinéraires déclarés sont identiques à l'alternative la plus rapide calculée. Dans la Figure 2-61, on peut observer que le 95^e percentile des ratios de temps de parcours commence à 2,34 pour les trajets de moins de 15 minutes, diminue à 1,66 pour les trajets de 15 à 30 minutes, puis reste en dessous de 1,56 pour les trajets de 30 à 120 minutes. Les trajets avec des temps de parcours supérieurs à 120 minutes ont des ratios avec un 95^e percentile de 2,29, mais cela n'affecte que 0,6% des déplacements. En regardant les mêmes ratios par tranche d'âge (Figure 2-62), on peut observer des ratios plus faibles pour les jeunes adultes que pour les enfants, les adolescents et les aînés. Pour tous les groupes d'âge, le 95^e percentile des ratios les plus élevés est de 1,8 et il reste inférieur à 1,6 pour les 20 à 60 ans. La Figure 2-63 présente les mêmes ratios, mais pour les activités déclarées à destination. Les activités liées au travail ont les ratios les plus bas, tandis que les activités scolaires et autres ont les ratios les plus élevés. Le 95^e percentile le plus élevé dans ce cas (1,69) est associé aux activités liées au magasinage.

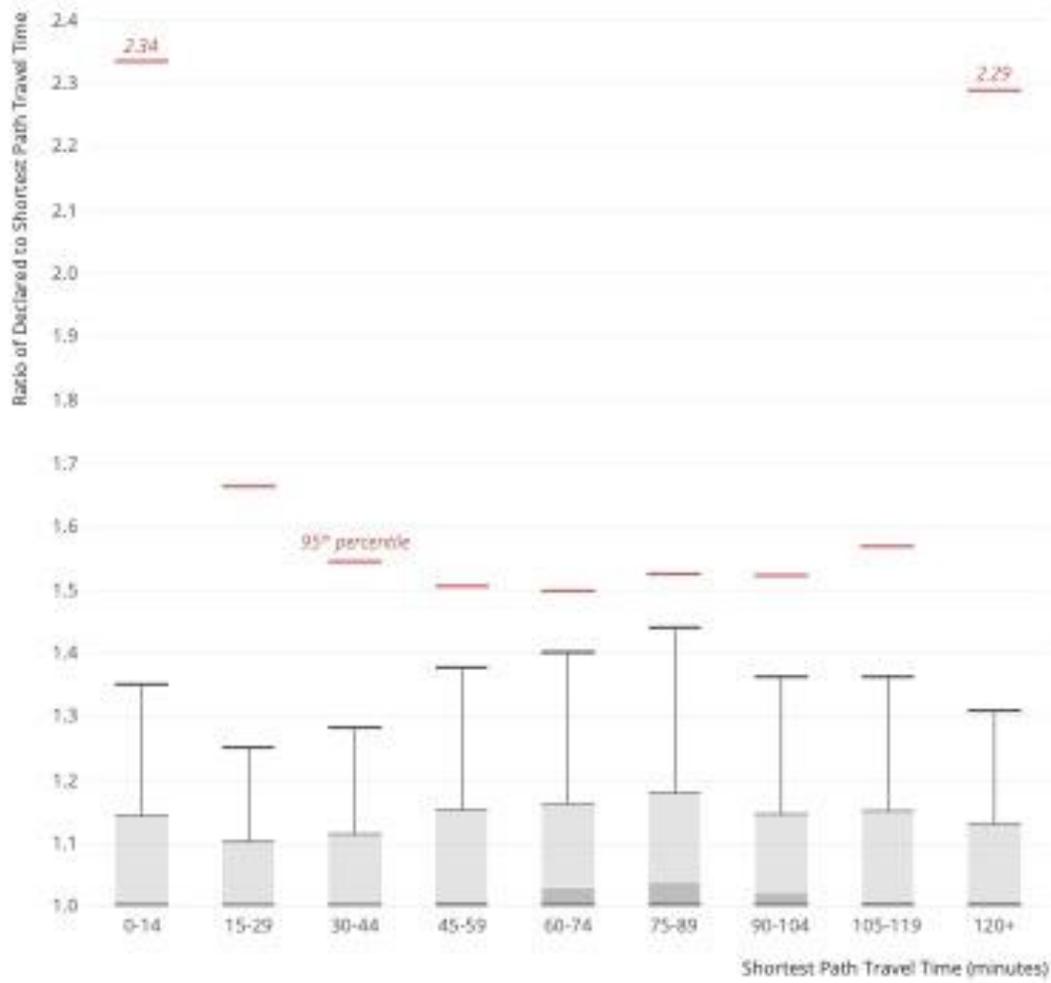


Figure 2-61 Percentiles des ratios entre le temps de parcours du trajet déclaré par rapport au trajet le plus rapide en fonction du temps de parcours du trajet le plus rapide

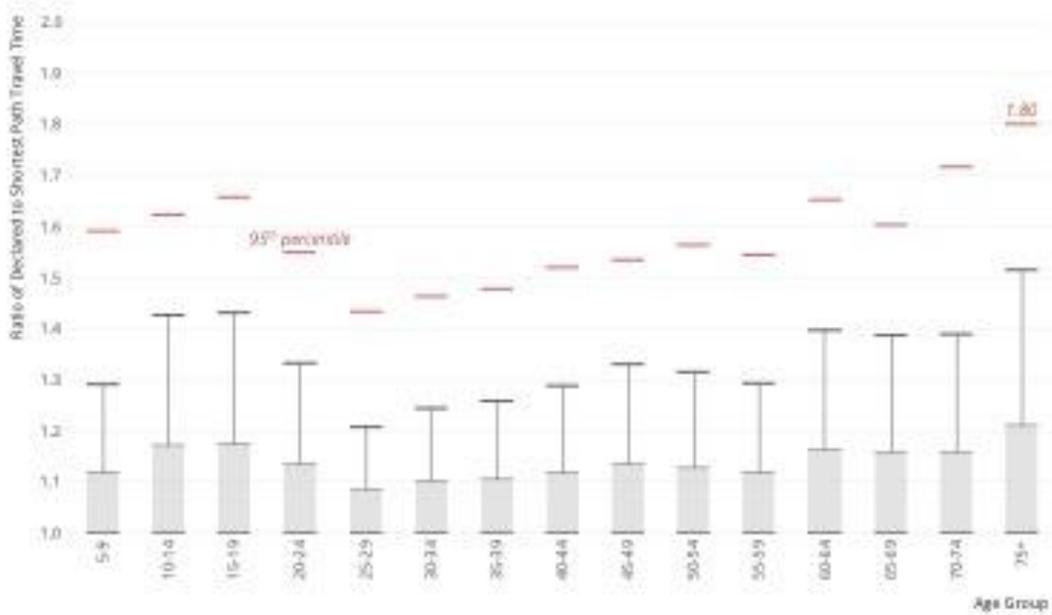


Figure 2-62 Percentiles des ratios entre le temps de parcours du trajet déclaré par rapport au trajet le plus rapide en fonction du groupe d'âge

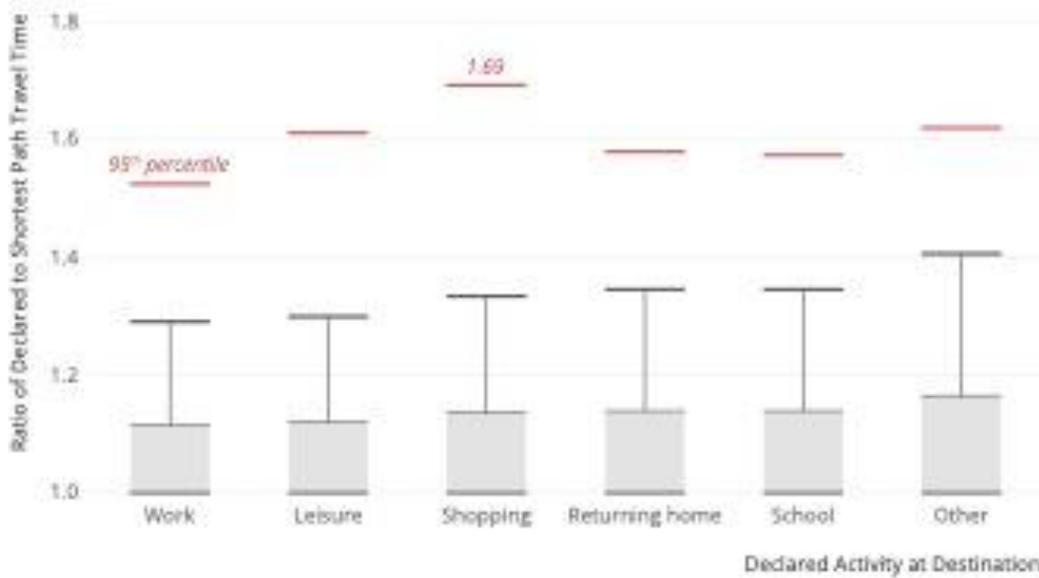


Figure 2-63 Percentiles des ratios entre le temps de parcours du trajet déclaré par rapport au trajet le plus rapide en fonction de l'activité à destination

2.11.5.2 Transferts

Parce qu'ils sont l'un des principaux inconvénients liés au transport en commun, les transferts doivent être analysés en particulier. En ce sens, la comparaison du nombre de transferts entre l'alternative la plus rapide et l'itinéraire déclaré est pertinente. La Figure 2-64 montre la distribution de la différence du nombre de transferts entre l'alternative la plus rapide et l'itinéraire déclaré, pour chaque plage de temps de trajet de 15 minutes. Alors que la plupart des

itinéraires déclarés ont le même nombre de transferts que l'alternative la plus rapide associée, il existe toutefois une tendance à choisir des alternatives avec moins de transferts que l'alternative la plus rapide, confirmant ainsi la pénibilité ressentie par les usagers du transport collectif lors d'un transfert. La Figure 2-65 montre les différences dans le nombre de transferts par activité à destination. Les répondants ont tendance à réduire davantage le nombre de transferts pour les activités liées au travail, tandis que les activités liées au magasinage sont moins enclines à provoquer une réduction des transferts.

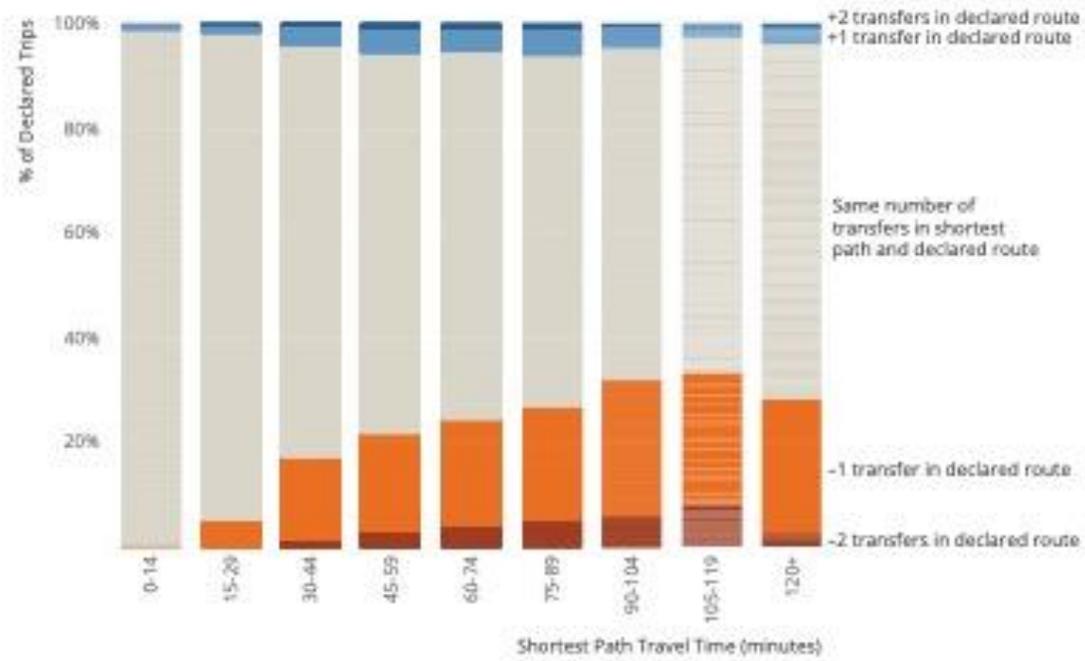


Figure 2-64 Différences dans le nombre de transfert selon le temps de parcours du trajet le plus rapide

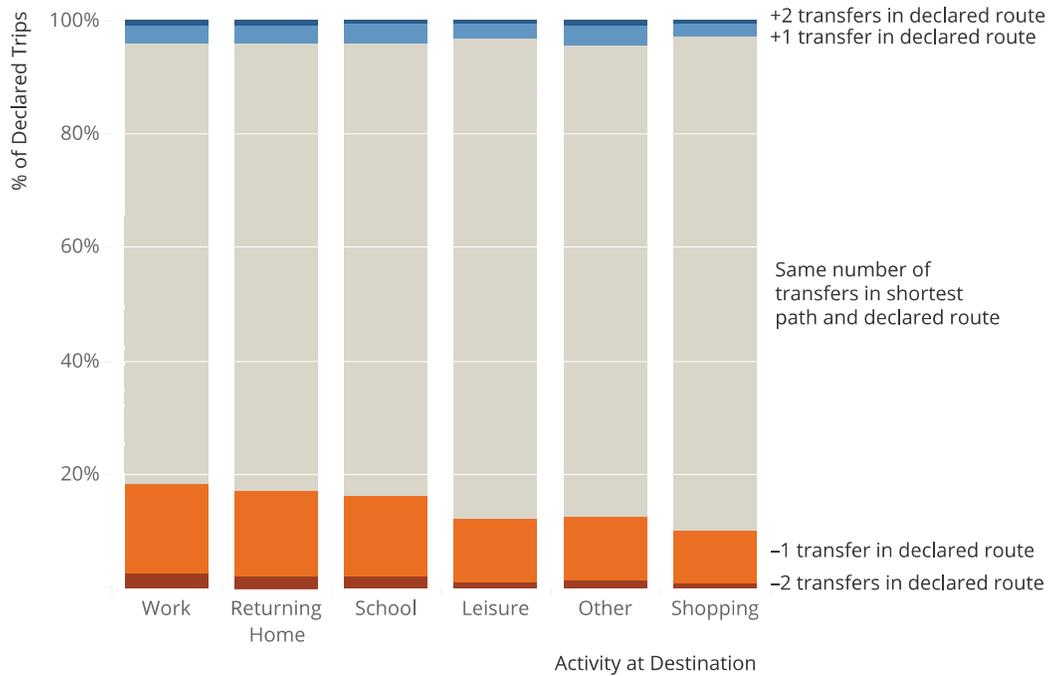


Figure 2-65 Différences dans le nombre de transfert selon l'activité à destination

2.11.5.3 Temps de marche

Lorsqu'on analyse l'effet de l'âge sur la différence du nombre de transferts sur l'itinéraire déclaré par rapport à l'alternative la plus rapide, on observe qu'en général, les jeunes et les aînés essaient de minimiser la marche plus que les autres, comme le montre la Figure 2-66. En particulier, les jeunes et les aînés qui ont choisi des itinéraires avec un ou deux transferts de moins que l'alternative la plus rapide marchent un peu moins en moyenne. L'effet est encore plus grand chez les aînés lorsqu'ils choisissent des itinéraires avec un transfert de plus que l'alternative la plus rapide, puisque leur temps de marche médian est presque 5 minutes de moins que celui des autres personnes.

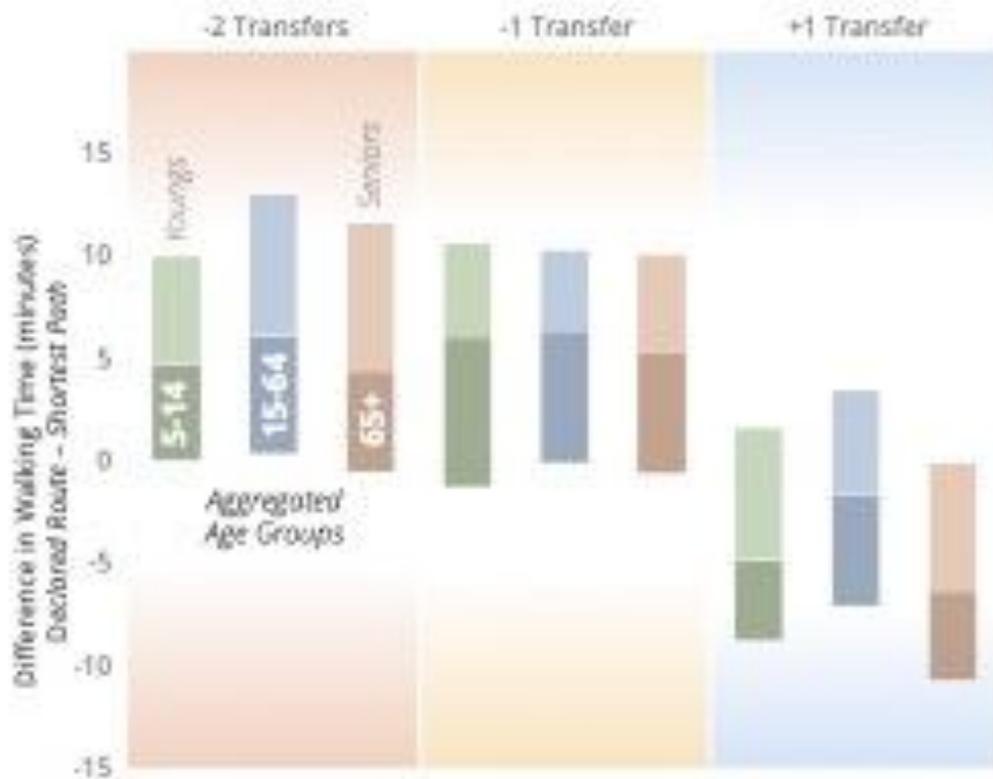


Figure 2-66 Différences dans le nombre de transfert selon le groupe d'âge

La Figure 2-67 montre que la plupart des combinaisons de modes choisies par les répondants de l'enquête étaient les mêmes que les modes de l'alternative la plus rapide. Cependant, il semble y avoir un plus grand nombre de trajets qui ont été déclarés comme bus uniquement ou métro uniquement, mais pour lesquels l'alternative la plus rapide utilise à la fois le bus et le métro ou uniquement le métro (les bandes verte et orange supérieures allant jusqu'aux bandes bleue et orange respectivement). À noter que le mode train de banlieue a été exclu de l'analyse en raison de la taille trop petite des échantillons pour obtenir des résultats représentatifs.

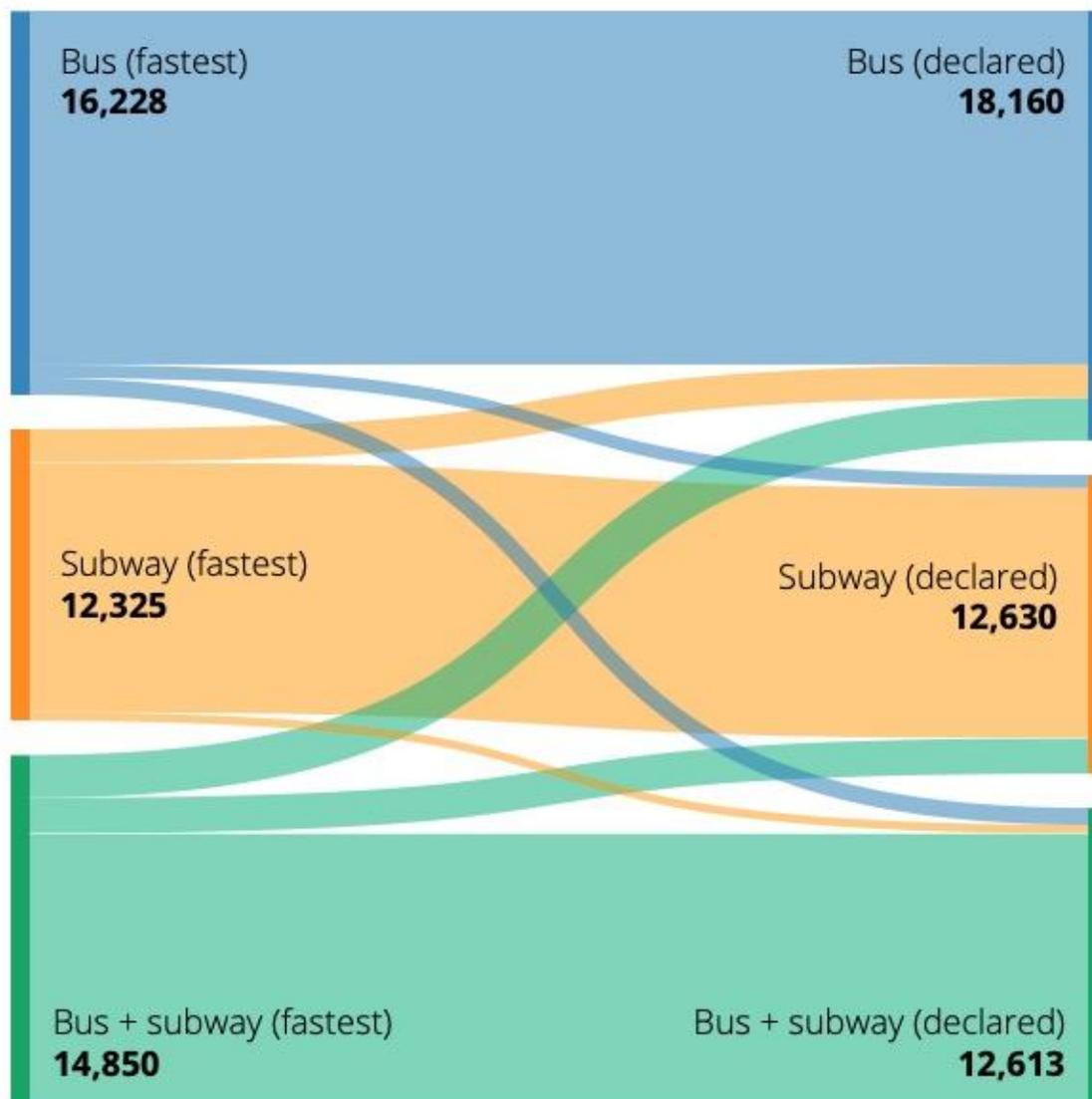


Figure 2-67 Comparaison des combinaisons de modes entre le trajet le plus rapide et le trajet déclaré

2.11.5.4 Sélection des contraintes pour améliorer les performances

Les 95^e percentiles des ratios de l'itinéraire déclaré sur l'alternative la plus rapide sont particulièrement utiles pour limiter le nombre d'alternatives que l'algorithme doit générer car il peut s'arrêter dès que les alternatives trouvées lors de la précédente série de combinaisons de filtrage n'ont renvoyé aucune alternative plus rapide que le 95^e percentile de ce ratio. Par exemple, si le chemin le plus court est de 35 minutes, dès qu'une série de combinaisons de filtrage ne renvoie que des alternatives de plus de 62 minutes (1,76 fois 35 min.), l'algorithme peut abandonner et renvoyer les alternatives calculées précédemment. Lorsque les données de choix d'itinéraire sont disponibles, ces ratios doivent être mesurés localement jusqu'à ce que d'autres études de cas permettent des ratios généralisables qui pourraient être utilisés avec d'autres réseaux métropolitains. De plus, étant donné que plus de 95% de toutes les routes déclarées ont un maximum de deux transferts de moins et un transfert supérieur au chemin le plus court, la spécification de la plage du nombre de transferts dans l'algorithme CSA lors du calcul des alternatives pourrait réduire le temps de calcul dans certains cas spécifiques. Enfin, lorsque les

caractéristiques sociodémographiques de l'utilisateur du transport en commun sont disponibles, les ratios et le nombre de transferts peuvent être fixés plus précisément avant de filtrer les lignes et de lancer les calculs associés.

2.11.6 Conclusion

Un algorithme de filtrage de lignes permettant d'obtenir les trajets alternatifs de transport collectif a été défini et présenté. À l'aide de cet algorithme, les choix d'itinéraire déclarés dans l'enquête Origine-Destination ont été comparés avec les alternatives calculées par l'algorithme pour une analyse plus approfondie. En particulier, les temps de trajet, le nombre de transferts et les temps de marche ont été comparés par groupe d'âge et par activité à destination. À partir des résultats des comparaisons, certaines contraintes ont été sélectionnées afin d'augmenter les performances de l'algorithme.

2.11.6.1 Limitations

Les principales limites du projet et de ses conclusions sont liées à la manière dont les choix d'itinéraires ont été déclarés et validés lors de l'enquête, à l'incertitude de l'heure de départ, à l'omission des trajets multimodaux et au fait que les données en temps réel et les retards dans le réseau n'ont pas été pris en compte dans l'analyse.

Itinéraires déclarés

Dans l'enquête Origine-Destination 2013 de Montréal, les itinéraires ont été déclarés par un répondant lors de l'entrevue téléphonique. Ainsi, le choix d'itinéraire des autres membres du ménage peut différer de l'itinéraire réellement utilisé par la personne (aucune donnée ne permet de valider ou invalider cette hypothèse). Une comparaison des résultats de cet article a été effectuée entre les trajets déclarés du répondant et les trajets des autres membres du ménage (proxy), mais la différence n'était pas significative avec les variables analysées. Cependant, une analyse détaillée des biais possibles des réponses proxy devra être effectuée avant d'optimiser davantage l'algorithme. De plus, les itinéraires déclarés ont été validés et corrigés par l'agence locale avec un logiciel qui ne calculait pas les itinéraires de transport collectif basés sur l'horaire, mais utilisait plutôt un algorithme de calcul de chemin basé sur l'algorithme de Dijkstra. Cette validation des itinéraires de transport collectif avant l'analyse peut ajouter des biais dans les données, car il n'est pas possible d'obtenir les lignes exactes déclarées par le répondant lors de l'entretien téléphonique.

Flexibilité de l'heure de départ

Les heures de départ déclarées dans l'enquête ne sont pas précises et ont tendance à être arrondies à l'heure, à la demi-heure ou aux 15 minutes les plus proches par le répondant. Étant donné que les données GTFS sont la plupart du temps précises à la minute près, il existe un biais associé à l'heure de départ déclarée, en particulier avec les lignes ayant des services peu fréquents ou des transferts impliquant des lignes qui ne sont pas synchronisées entre elles. Une analyse rigoureuse de l'effet de la modification de l'heure de départ dans une plage de +/- 15 minutes sera nécessaire.

Déplacements multimodaux

Bien que les déplacements bimodaux (P+R, K+R et B+R) aient été enregistrés au cours de l'enquête, ces déplacements n'ont pas été inclus dans l'analyse. Plus de détails sur les lieux de transfert seraient nécessaires pour générer des alternatives multimodales qui incluraient des segments de voiture ou de vélo ainsi que des segments de transport collectif. La génération d'alternatives multimodales sera étudiée dans un futur projet de recherche et comprendra des

données de véhicules en libre-service et de vélopartage pour une meilleure génération d'alternatives de trajets multimodaux.

Données en temps réels et délais

Les alternatives n'ont pas été comparées pour leur robustesse, leur flexibilité en cas d'imprévu ou leur capacité à résister ou à atténuer la propagation des retards. Des données opérationnelles historiques seraient nécessaires pour estimer l'effet des retards sur le choix de l'itinéraire.

2.11.6.2 Perspectives

Utilisation de données transactionnelles (cartes à puce)

En plus des données d'enquête, les données des cartes à puce doivent être analysées et comparées aux alternatives le plus rapides et aux autres alternatives calculées à l'aide de l'algorithme présenté ici. Ces données sont encore plus précises que les itinéraires déclarés puisqu'elles incluent les arrêts d'embarquement (les arrêts de débarquement aussi dans certaines villes, mais pas dans la région de Montréal), et le voyage utilisé, à partir duquel on peut déduire l'achalandage et préciser le l'horaire. Cependant, la plupart du temps, il n'est pas possible d'obtenir les positions géographiques exactes de l'origine et de la destination. Pour cette raison, l'utilisation des données d'enquête demeure essentielle pour obtenir une bonne estimation des temps de marche d'accès à l'origine et à destination. Il permet également de tenir compte des différences sociodémographiques et des activités à l'origine et à destination.

Pondération du choix d'itinéraire

Parallèlement à cette recherche, des travaux sont en cours pour pondérer les temps de marche, d'attente, de transfert et en véhicule à partir des alternatives générées afin de pouvoir calibrer un modèle de choix d'itinéraire représentatif pour une meilleure prédiction dans les futurs réseaux de transport collectif ou lors d'ajustements dans les réseaux existants.

2.12 Évaluation économique du coût de la pollution atmosphérique découlant du secteur des transports : données, méthodes et pratiques

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

2.12.1 Introduction

Le corpus de preuves scientifiques quant aux effets de la pollution atmosphérique n'a cessé de croître ces 30 dernières années. Ses effets sur les changements climatiques, mais aussi la santé humaine, la préservation des écosystèmes et de la biodiversité, les constructions ainsi que les activités économiques comme le tourisme et l'agriculture, sont désormais reconnues mondialement.

Cela n'a pas toujours été le cas. La Suède a été le premier pays, en 1988, à tenir compte de l'aspect environnemental dans ses évaluations de projets et à légiférer en ce sens. Dans les années subséquentes, de manière plus ou moins timide, plusieurs pays ont emboîté le pas. C'est le cas notamment du Québec qui s'est doté, en 1997, d'un cadre d'évaluation des coûts de la congestion prenant en compte les effets externes sur l'environnement. Ce cadre a, par la suite, servi de base à l'établissement du guide de l'analyse avantages-coûts des projets publics en transport routier.

Les gouvernements ont longtemps été réticents à tenir compte des impacts environnementaux dans l'évaluation des projets de transport. Il faut dire que les premières études scientifiques rapportaient une variété de résultats parfois difficiles à réconcilier. L'écart important dans les résultats s'explique tout d'abord par le fait que les évaluations environnementales se concentrent typiquement sur des polluants spécifiques (ex. CO₂, O₃, NO_x) et/ou des impacts spécifiques (ex. cancérologie, réchauffement climatique, revêtement). La diversité de résultats s'explique ensuite par les différentes méthodes d'estimation utilisées.

L'évaluation du coût économique des impacts environnement nécessite trois ensembles de connaissances distincts : (1) des connaissances sur les polluants atmosphériques (concentrations spatiales, interactions chimiques et physiques, etc.); (2) des connaissances sur les répercussions de ces polluants sur la santé, l'économie et l'environnement; (3) des méthodes permettant de traduire en dollars ces répercussions pour la société (évaluation économique). Ces trois ensembles de connaissances continuent de faire l'objet de découvertes scientifiques chaque année, renforçant les certitudes quant aux impacts environnementaux de la pollution atmosphérique et la volonté d'agir de la société.

La traduction des impacts de la pollution atmosphérique en dollars a pour principal objectif de comparer les coûts pour la société de ne pas agir (statu quo) relativement à une gamme de solutions potentielles (ex. réglementation, taxation des externalités, subventions de programmes de financement ou de projets d'infrastructures, mécanismes de financement croisé). L'évaluation économique des impacts environnementaux trouve donc ses assises dans la théorie économique de l'analyse avantages-coûts.

Ce projet de recherche pose ainsi la question suivante : les guides d'évaluation de projets et autres mécanismes d'aide à la décision, qui guident nos choix collectifs en matière d'investissement et de programmes de transport au Québec, reflètent-ils adéquatement l'état des connaissances scientifiques ainsi que les meilleures pratiques en ce qui a trait à la prise en compte des impacts de la pollution atmosphérique ?

Ce projet de recherche vise à (1) présenter l'état des connaissances sur la nature et les impacts de la pollution atmosphérique; (2) mettre en perspective la part de responsabilité du secteur des transports dans les émissions atmosphériques totales; (3) présenter la théorie économique et les méthodes d'estimation qui supportent l'évaluation des impacts environnementaux; (4) effectuer une revue des pratiques internationales; (5) effectuer un bilan des guides d'évaluation de projets et autres mécanismes d'aide à la décision utilisés au Québec prenant en considération les impacts de la pollution atmosphérique. Ce projet de recherche, dans le cadre des travaux de la Chaire, s'inscrit finalement dans une volonté de vulgarisation et de partage interdisciplinaire des savoirs.

2.12.2 État d'avancement des travaux de recherche

Ce texte présente un sommaire de l'état d'avancement des travaux.

2.12.2.1 *Théorie économique : externalités négatives et cadre d'analyse avantages-coûts*

Cette section et la suivante présentent une synthèse des fondements théoriques concernant les externalités, l'analyse avantages-coûts et les techniques de valorisation économiques. À moins d'avis contraire, le contenu de ces sections repose sur les enseignements et travaux de Boardman et al., (2006), Nicholson and Snyder (2008), OECD (2018) et Stiglitz et al. (2007).

Une externalité négative est un phénomène qui se produit lorsqu'un acteur (qu'il s'agisse d'un individu, d'une entreprise ou d'un gouvernement) ne supporte pas la totalité des coûts rattachés à ses décisions. Ces coûts sont alors transférés à de tiers partis qui n'ont pas participé à la prise de décision et qui en subissent les désagréments. Ces coûts transférés sont appelés coûts sociaux.

Les externalités sont souvent liées à une problématique de marché manquant. Le processus de production ou de consommation entraîne, en quelque sorte, une décomposition du bien en deux parties. D'une part, le bien pour lequel il existe une demande de marché (ex. l'essence) et dont le prix correspond au coût marginal du producteur sur un marché concurrentiel. D'autre part, l'externalité (ex. la pollution atmosphérique) pour laquelle il n'existe habituellement pas de demande en soi et donc pas de prix de marché. Les externalités se produisent pour une variété de raisons, telles que la nature de la ressource ou de la technologie ou encore la présence d'effets de synergies ou de réseaux. À titre d'exemple, les synergies entre le transport et l'habitation font en sorte que l'étalement urbain génère une gamme d'externalités qui ne sont pas prises en compte par le marché.

La Figure 2-68 illustre le cas d'une externalité négative comme la pollution atmosphérique. L'offre du marché reflète le coût marginal privé du producteur en fonction du volume de production. La seconde courbe d'offre incorpore, en plus des coûts privés, les coûts sociaux liés à l'externalité. Les biens (ou services) qui donnent lieu à des externalités négatives sont offerts sur le marché à des prix inférieurs à leur coût réel pour la société. Ils sont consommés en surabondance ($Q > Q^*$) et entraînent donc une allocation inefficace et donc un gaspillage (aussi appelé perte sèche en langage économique) des ressources de la société.

La distance entre ces deux courbes d'offre, t , peut être perçue comme le montant que les personnes qui subissent l'externalité seraient prêtes à payer pour l'éviter. L'écart entre les deux courbes d'offre (coût marginal privé et coût marginal social) dépend de la présence ou non d'une compensation partielle du marché pour l'externalité. Les propriétés localisées aux abords d'infrastructure routières, qui subissent le bruit des véhicules au quotidien, sont typiquement moins dispendieuses que d'autres propriétés aux caractéristiques équivalentes.

Les externalités constituent un exemple typique de défaillances de marché et confèrent un rôle d'intervention au gouvernement. En 1920, Arthur Pigou est le premier économiste à avoir offert

une analyse complète des distorsions de marché causées par les externalités négatives et à suggérer que la solution la plus directe pour mitiger ce problème était la taxation. Les taxes visant à rectifier les systèmes de prix en présence d'une externalité sont donc communément appelées taxes pigouviennes. Une telle taxe peut être imposée au producteur ou aux consommateurs. Au Canada, la taxe sur le carbone, imposé aux producteurs, est une application concrète de ce principe. La taxe sur l'essence, imposée aux consommateurs, lorsque ses produits servent à compenser la pollution atmosphérique et non pas uniquement à couvrir le financement des routes, en est une autre. Depuis une dizaine d'années, les gouvernements cherchent par ailleurs à corriger la problématique du marché manquant pour la pollution par la création de systèmes de plafonnement et d'échange de droit d'émission. Le Québec est l'une des premières juridictions au monde à avoir instauré un tel mécanisme de marché. Le gouvernement fédéral lui a emboité le pas quelques années plus tard (Canada, 2018; MELCC, 2018).

Si une taxe, d'un montant t , était imposée sur chaque unité vendue, cela entraînerait une diminution de la quantité demandée (Q^*). Le nouvel équilibre de marché se produisant là où l'avantage marginal privé des consommateurs équivaut au coût marginal social de la société.

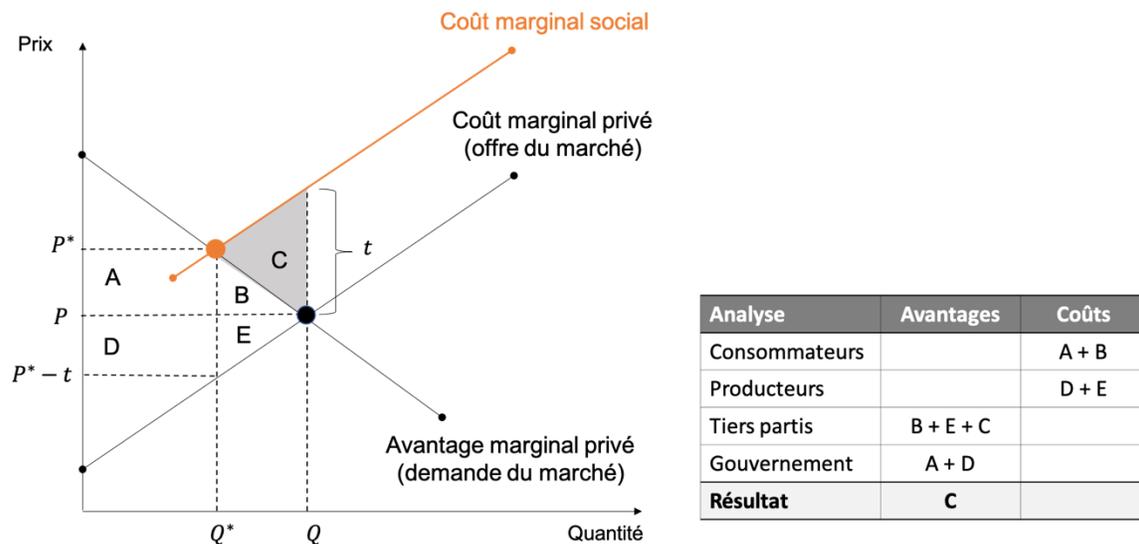


Figure 2-68: Représentation théorique d'une externalité. Source : figure adaptée de Boardman et al. (2006)

L'évaluation économique des impacts pour la société d'une modification de l'équilibre de marché est typiquement réalisée au moyen d'un cadre d'analyse avantages-coûts (AAC). Le bénéfice net associé à l'imposition d'une taxe pigouviennne est également illustré à la Figure 2-68. Le gouvernement perçoit des revenus de taxation équivalents au produit de t et Q^* ($A + D$). L'imposition de la taxe entraîne ainsi une réduction du surplus du consommateur ($A + B$) puisque ces derniers doivent payer plus cher pour une quantité moindre de biens. Elle entraîne également une réduction du surplus du producteur ($D + E$), puisque ces derniers vendent moins de biens et font moins de profit. Cette représentation théorique illustre l'importance de choisir adéquatement le montant d'une taxe pour assurer, à la fois, le bien-être individuel et collectif. Les tiers partis, qui assumaient auparavant les coûts de la pollution, obtiennent cependant un gain découlant de la réduction de la pollution ($C + B + E$). Le bénéfice net (avantages-coûts), pour la société, associé à l'imposition d'une taxe d'un montant t équivaut donc à la zone C.

L'AAC est perçu comme un outil d'évaluation et un instrument d'action publique simple, rationnel et systématique. Un projet sera en effet jugé acceptable si ses bénéfices sont supérieurs à ses

coûts. Un cadre AAC rigoureux exige en outre que toutes les alternatives à un projet soient considérées afin d'assurer que le bénéfice net estimé maximise le bien-être de la société. Son pouvoir d'exprimer dans une même unité de mesure les coûts et les avantages facilite la comparaison de différents projets.

Si ses principes théoriques de l'AAC sont établis depuis longtemps, l'enjeu réside dans leur application concrète. Cette règle de décision toute simple, un bénéfice net positif, repose sur plusieurs étapes méthodologiques complexes en raison de leur interdisciplinarité. L'évaluation de la pollution atmosphérique dépend, en l'occurrence, des instruments de mesure de la pollution (ingénierie), des connaissances scientifiques quant aux impacts de la pollution sur la santé (épidémiologie), l'environnement (écologie) et biens et services économiques (évaluation financière et actuarielle des dommages) et finalement de la qualité des méthodes utilisées pour mesurer la valeur que leur accorde la société (sciences économiques), tout cela devant être fait à des horizons temporels parfois plus ou moins définis.

À titre d'exemple, entre 2000 et 2010, le nombre de décès attribuables à la pollution ambiante aurait été multiplié par quatre. Cet état des faits est attribuable, d'une part, aux techniques de contrôle plus avancées qui sont utilisées pour mesurer les émissions et les concentrations ambiantes de polluants à l'échelle mondiale et, d'autre part, aux avancées scientifiques en matière d'épidémiologie qui permettent d'attribuer avec davantage de précision l'effet de chacun des facteurs de risque à chaque maladie (OCDE, 2014).

2.12.3 Techniques de valorisation économique des impacts environnementaux

Les fondements théoriques de la valorisation économique reposent généralement sur les postulats suivants :

- Les préférences individuelles sont à l'origine de la valeur selon la théorie néoclassique du bien-être. Si un individu préfère A à B, cela signifie que A lui procure davantage de bien-être et d'utilité et donc qu'il lui accorde une plus grande valeur.
- Les préférences individuelles peuvent être agrégées. L'avantage social est donc la somme de tous les avantages individuels et le coût social, la somme de tous les coûts individuels.
- Les préférences sont typiquement mesurées par le consentement à payer (CAP) pour bénéficier d'un avantage et par un consentement à accepter (CAA) une compensation pour subir un désavantage.
- Si ceux qui tirent un avantage d'un changement ont la capacité d'offrir une compensation à ceux qui subissent une perte en raison de ce même changement et qu'ils continuent de bénéficier d'un gain net, alors la règle fondamentale selon laquelle les avantages doivent être supérieurs aux coûts est respectée (principe Kaldor-Hicks).

La somme nette de tous les CAP et tous les CAA associés au résultat d'un projet et à considérer dans le cadre d'AAC sur un actif environnemental est appelée valeur économique totale (VET). Celle-ci incorpore différentes catégories selon la nature du projet étudié. Elle se répartit typiquement en *valeurs d'usage* (bénéfices directs découlant de la consommation effective ou envisagée) et en *valeurs de non-usage* (valeur d'existence, valeur altruiste, valeur patrimoniale). Certains projets tiennent également compte de la *valeur d'option*, soit la disposition à payer (DAP) pour sauvegarder un bien afin de conserver la possibilité de l'utiliser dans l'avenir, et/ou de *quasi-option*, la DAP associée à de potentielles découvertes scientifiques qui pourraient révéler, dans un avenir incertain, des usages qui ne sont pas encore connus d'une ressource. Certaines de ces catégories sont moins pertinentes à l'évaluation des impacts de la pollution atmosphérique. Elles

pourraient cependant s'avérer pertinentes dans le cadre d'une évaluation économique qui traiterait plus largement des impacts d'un projet de transport et qui entraînerait, par exemple, la destruction d'un milieu humide.

Il existe deux grandes familles de méthodes indirectes d'estimation (appropriées pour les situations où il y a absence de marché comme la pollution de l'air) et qui renvoient elles-mêmes à un éventail de techniques d'évaluation des CAP et des CAA: les méthodes des préférences révélées et des préférences déclarées.

Les méthodes de **préférences révélées** (marchés subrogés) s'appuient sur le fait que les biens environnementaux (incluant ses nuisances comme les externalités) font l'objet de transactions implicites (laissent des traces) sur les marchés réels, permettant ainsi de déduire indirectement leur valeur. Cette branche d'évaluation a connu des avancées majeures ces dernières années par l'accessibilité à de nouvelles bases de données et au développement de méthodes économétriques plus poussées. Elle comprend trois principales techniques :

- **Prix hédoniques** : le bien environnemental est considéré comme un attribut. À caractéristiques constantes, la valeur des propriétés résidentielles peut offrir une certaine estimation de la valeur d'un parc, de la pollution sonore ou atmosphérique. L'approche méthodologique la plus couramment utilisée dans ces études a consisté à tenir compte de la distance séparant le bien immobilier de l'aménité ou de la nuisance environnementale en tant que variable explicative dans le cadre du modèle. Le recours au SIG permet également désormais de tenir compte de l'abondance relative de certaines aménités dans un rayon donné.
- **Coûts d'évitement** : repose sur l'étude des comportements de prévention ou l'achat de produits de protection. Les dépenses pour l'achat de casques de vélo ou les détours effectués pour éviter un chemin peuvent être utilisés pour mesurer la valeur accordée à la sécurité routière par exemple. L'installation de fenêtres à double vitrage donne une indication de la valeur accordée par les ménages aux politiques de modération de la circulation ayant pour effet de diminuer la pollution sonore (nuisance) et d'accroître le calme et la quiétude (bien).
- **Coût de déplacement** : cette technique est généralement utilisée pour mesurer la valeur d'espaces naturels extérieurs. La méthode des coûts de déplacement part du principe que les individus ont recours à divers éléments pour vivre des expériences récréatives (coût du déplacement aller-retour, nuitées à l'hôtel, repas) et qui peuvent être utilisées comme indicateur de la valeur du site considéré.

Les méthodes de **préférences déclarées** (marchés hypothétiques) demandent directement aux personnes interrogées d'indiquer leur CAP ou leur CAA en fonction d'une variation hypothétique de l'offre d'un bien non-marchand.

- **Évaluation contingente**. Les préférences individuelles concernant les variations quantitatives ou qualitatives de l'offre de biens non-marchands sont directement exprimées en termes monétaires. Les questionnaires visent à déterminer la valeur estimée que les individus attribuent à la concrétisation ou au contraire à l'évitement des changements considérés. Le questionnaire comprend typiquement des questions préliminaires, la présentation du scénario contingent (qualité et fiabilité du bien, calendrier, moyens logistiques, mode de paiement, existence de substituts, nécessité de

- procéder à des ajustements compensatoires des autres postes de dépenses), l'invitation à déclarer la valeur que les personnes interrogées attribueraient au bien considéré si elles avaient la possibilité de se le procurer dans les conditions indiquées ainsi que diverses questions sociodémographiques visant à contrôler la représentativité de l'échantillon. L'évaluation contingente est notamment utilisée pour évaluer la valeur statistique d'une vie humaine. La valeur dérivée représente la VDP pour réduire le risque de mort prématurée, par exemple de 1 pour 100 000, associé à la pollution ambiante.
- **Choix discrets.** Cherche à tenir compte de la nature multidimensionnelle des changements subis par une ressource environnementale. Elle s'appuie sur le concept d'utilité aléatoire et utilise la théorie des plans d'expérience pour décrire différents scénarios envisageables qui s'excluent mutuellement. Les personnes interrogées sont invitées à choisir l'option qu'elles préfèrent. En variant les niveaux des attributs d'une option à une autre et en incluant un attribut monétaire, il est possible d'estimer la valeur totale ainsi que la valeur des attributs qui caractérisent un bien. Ces valeurs ne sont pas données directement comme pour l'évaluation contingente, mais elles sont plutôt déduites indirectement des choix faits par les personnes interrogées.

Chacune de ces méthodes présente des opportunités, des avantages, des problématiques et des limites méthodologiques qui leur sont propres face à une question donnée.

2.12.3.1 État des connaissances sur les polluants atmosphériques

Les contaminants atmosphériques sont non seulement le fruit d'émission de polluants atmosphériques directs, mais aussi d'une série de réactions chimiques secondaires. Les relations entre ces gaz et les conséquences qu'ils entraînent sur la santé, l'environnement, l'économie et les changements climatiques sont complexes, tel qu'illustré à la Figure 2-69.

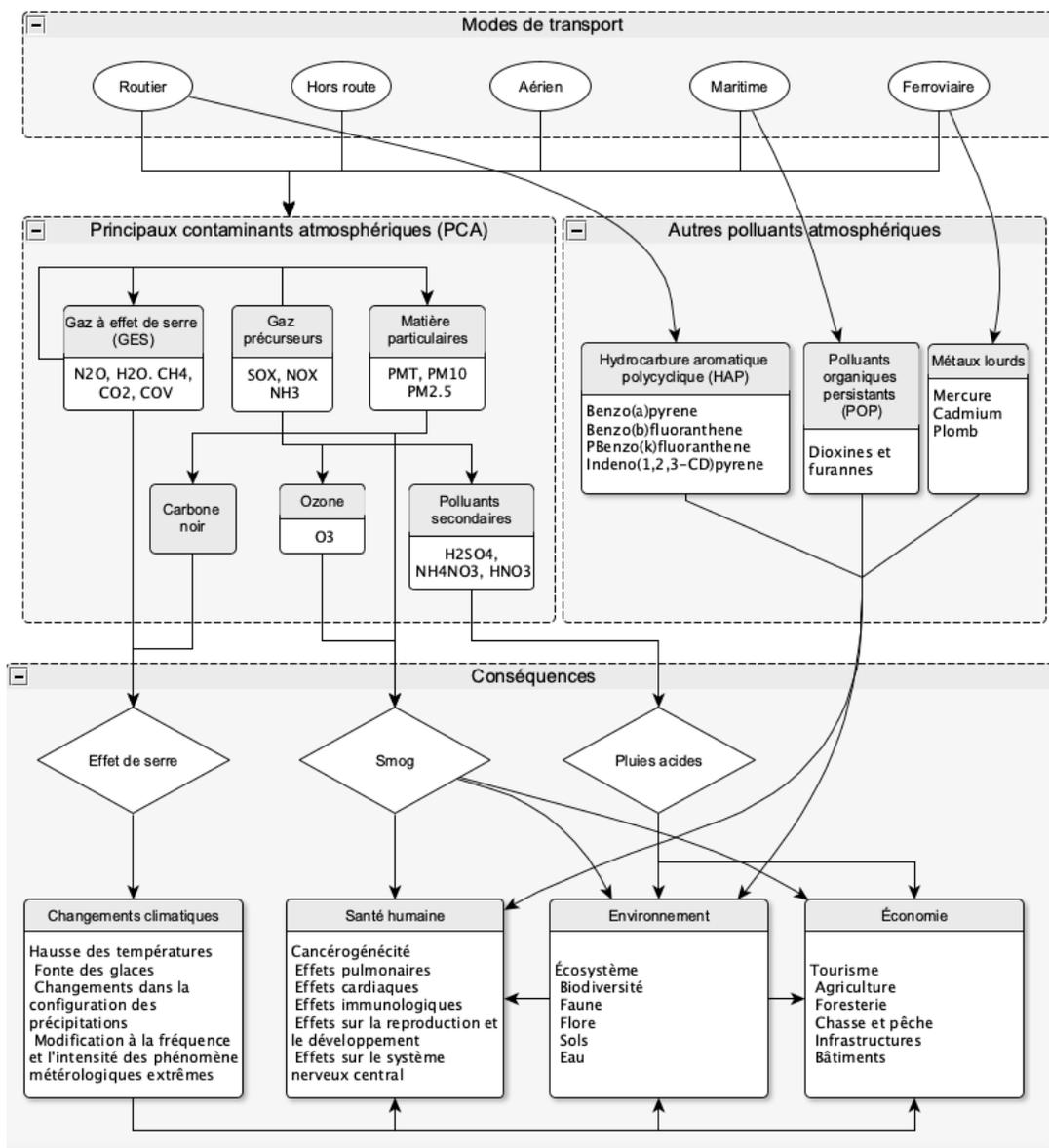


Figure 2-69: Schématisation des connaissances sur les polluants atmosphériques émis en transport et leurs impacts (Sources : Canada, E. et C. climatique (2004a, 2004b); Environnement Canada (2012, 2019), ECCC (2021), INSPQ (2018), OCDE (2014, 2018), Roy, R., Braathen (2017))

Les polluants atmosphériques présentent des différences importantes quant à leur composition chimique, leur réactivité, leurs sources, leur persistance dans l'environnement, leur capacité à voyager ainsi que leurs répercussions sur la santé humaine, l'environnement et l'économie. Les polluants sont ainsi typiquement regroupés en quatre catégories (Canada, 2017):

- **Les principaux contaminants atmosphériques (PCA)** sont produits en grande quantité et sont à l'origine des principaux problèmes de contamination atmosphérique, soit l'effet de serre, le smog et les pluies acides. Les types d'émissions qui en résultent peuvent être classés en quatre grandes catégories :
 - **Gaz à effet de serre (GES)** : entraînent un réchauffement climatique à l'échelle planétaire. Certains gaz sont naturellement présents dans l'atmosphère et

contribuent à retenir la chaleur et à maintenir la vie sur Terre (vapeur d'eau (H₂O), gaz carbonique (CO₂), méthane (CH₄), oxyde nitreux (N₂O), ozone (O₃)). D'autres sont le fruit d'activités humaines (hexafluorure de soufre (SF₆), trifluorure d'azote (NF₃)). Chaque gaz a une durée de vie unique et un potentiel propre de rétention de la chaleur, appelée « potentiel de réchauffement planétaire » (PRP). Le gaz carbonique est associé à un PRP de valeur 1 et sert de base de référence pour comparer les autres gaz. Le PRP est donc une mesure relative de l'effet de réchauffement associé à l'émission d'un kilogramme d'un GES à la surface troposphérique (MELCC, 2020).

- **Matières particulaires (PM)** : fragments en suspension dans l'air sous forme solide ou liquide. Elles ont des répercussions plus locales et affectent surtout la santé humaine. La taille des particules détermine la portée des dommages. On distingue trois diamètres : totales (PMT), grossières (PM₁₀) ainsi que fines ou ultrafines (PM_{2,5}). Les particules dites primaires proviennent d'émissions directes naturelles et anthropiques. Les particules dites secondaires sont le résultat d'une série de réactions chimiques où interviennent différents gaz précurseurs, tels que les oxydes de soufre (SO_x), les oxydes d'azote (NO_x) et l'ammoniac gazeux (NH₃). On distingue par ailleurs typiquement le carbone élémentaire (C_{élé}) du carbone organique (C_{org}). Le C_{élé} est associé à la suie formée pendant la combustion et est souvent utilisé comme synonyme pour le carbone noir.
- **Ozone troposphérique (O³)** : gaz incolore et extrêmement irritant qui se forme juste au-dessus de la surface de la Terre dans la basse atmosphère. Il est considéré comme un polluant secondaire puisqu'il ne provient pas directement de sources biosynthétiques (naturelles) ou anthropiques (humaines). Il se forme à la suite d'une série complexe de réactions chimiques, notamment lorsque les oxydes d'azote (NO_x) et les composés organiques volatils (COV) réagissent au soleil et à l'air stagnant.
- **Carbone noir** : deuxième plus important contributeur au réchauffement climatique après le dioxyde de carbone (CO₂). Se forme principalement dans les moteurs à combustion interne. Lorsqu'il retombe sur le sol, le carbone noir assombrit les surfaces et aggrave le réchauffement, en particulier des territoires enneigés. Comme les autres particules fines, les particules de carbone noir peuvent pénétrer profondément dans les poumons et engendrer des maladies cardiovasculaires et respiratoires (Santé Canada, 2016).
- **Polluants organiques persistants (POP)** subsistent pendant de longues périodes dans l'environnement et peuvent être transportés sur de grandes distances. Les POP sont jugés particulièrement préoccupants parce qu'ils peuvent se retrouver dans les aliments et se bioaccumuler dans les tissus. Ils peuvent ainsi avoir des effets significatifs sur la santé humaine et l'environnement, même à de faibles concentrations. Les POP menacent sérieusement l'environnement et la santé humaine partout dans le monde, mais plus particulièrement dans les climats plus froids comme le Nord du Canada (Canada, 2015).
- **Métaux lourds (ML)** peuvent être transportés dans l'atmosphère et pénétrer dans l'eau et les sols. Les faibles concentrations de métaux lourds sont toxiques et peuvent également se bioaccumuler dans les tissus. Les transports maritimes, ferroviaires et

aériens libèrent différents métaux lourds, dont le mercure (Hg), le plomb (Pb) et le cadmium (Cd).

- **Autres substances toxiques** : Le secteur des transports routier, en particulier les véhicules à essence, libèrent différents aérocontaminants toxiques tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dont: le benzo(a)pyrène (B(a)P), le benzo(b)fluoranthène (B(b)F), le benzo(k)fluoranthène (B(k)F) et l'indeno(1,2,3-cd)pyrène. Les HAP sont considérés comme cancérigènes à l'échelle internationale.

2.12.3.2 Impacts de la pollution atmosphérique

De l'interaction entre les différents polluants atmosphériques découlent trois principales conséquences sur la santé humaine, l'environnement, l'économie et la société : les pluies acides, le smog et l'effet de serre. Cette section contient pour le moment des illustrations. Au terme du projet de recherche, la revue des écrits scientifiques donnera à la fois un regard d'ensemble sur les conséquences de la pollution atmosphérique ainsi qu'une vue sur les découvertes, les méthodes et les résultats les plus récents.

Pluies acides

À la fin des années 1980, les tenants et les aboutissants des pluies acides étaient encore très mal compris (Brundtland, 1987). Nous savons aujourd'hui que les pluies acides se produisent lorsque les précipitations (ex. pluie, neige, grêle) récoltent des particules d'acide et des gaz en tombant sur la terre. Un dépôt acide se produit lorsque les émissions de dioxyde de soufre (SO₂) et d'oxyde d'azote (NO_x) se transforment en polluants secondaires, tels que l'acide sulfurique (H₂SO₄), le nitrate d'ammonium (NH₄NO₃) et l'acide nitrique (HNO₃). Les émissions acidifiantes contribuent par ailleurs à la formation de la brume sèche et du smog. Celles-ci peuvent se déplacer à des milliers de kilomètres de leur source. Les pluies acides peuvent endommager les cours d'eau, la faune et la flore, les sols ainsi que les bâtiments, les infrastructures (ex. conduit d'eau) et les véhicules en plus de nuire à la santé humaine. La géologie canadienne, composée en grande partie de roches dures comme le granit, offre peut de résistance naturelle aux dépôts acides. Les sols et les eaux, souffrant d'un manque d'alcalinité, ne peuvent neutraliser naturellement l'acide. Les provinces de l'est, de l'Ontario aux Maritimes sont les plus touchées (Canada, 2004a).

Smog

Le terme « smog » est apparu dans les années 1980 pour désigner la présence d'une brume sèche toxique dans l'atmosphère. À partir de cette époque, des programmes gouvernementaux ont été mis en place afin de contrôler l'ozone troposphérique (O₃) auquel il était associé. Les recherches scientifiques subséquentes ont permis d'établir d'autres contributeurs à la formation du smog. Depuis le début des années 2000, le smog englobe également l'effet des particules fines (PM) ainsi que des polluants précurseurs de l'ozone (SO₂, NO_x, COV et NH₃) (Canada, 2004b). Le smog est associé à plusieurs effets néfastes sur la santé humaine (décès prématurés, hospitalisations, consultations, journées de travail perdues, morbidité), la santé de la faune et de la flore, les constructions (ex. détérioration des structures et des bâtiments) ainsi qu'à des problèmes de visibilité (Environnement Canada, 2019).

La pollution ambiante est un facteur de risque désormais mondialement reconnu pour augmenter les risques de mortalité et de morbidité associés à divers problèmes de santé chroniques, dont les cancers, les infections des voies respiratoires inférieures, les accidents vasculaires cérébraux et les maladies cardiaques. L'édition 2017 du *Global Burden of Disease* ajoute par ailleurs à la liste

des maladies dont le risque est affecté par la pollution ambiante, et plus particulièrement par les particules fines (PM_{2,5}), le diabète de type 2 (The Lancet, 2017).

Les estimations de mortalité prématurées relèvent généralement d'une évaluation de l'exposition à court et à long terme des populations à des polluants précis ainsi que sur la relation mathématique entre l'exposition et le risque accru de mortalité, nommée « relation concentration-réponse » (RCR). Les particules fines (PM_{2,5}), le dioxyde d'azote (NO₂) et l'ozone (O₃) figurent parmi les polluants pour lesquels des preuves épidémiologiques solides quant à leurs impacts négatifs sur la santé ont été démontrés. Toutes les données probantes indiquent par ailleurs l'absence d'un seuil d'innocuité, c'est-à-dire une concentration en-dessous de laquelle il n'y aurait aucun effet sur la santé (INSPQ, 2018). Les effets cumulatifs tout au long de l'année ne devraient d'ailleurs pas être sous-estimés. Une analyse effectuée en 2001, pour le compte de la Ville de Toronto, a révélé que 90 % des effets de pollution atmosphérique étaient attribuables aux « bonnes » journées selon l'indice de la qualité de l'air (Environnement Canada, 2012).

Une méta-analyse produite en 2012 par l'Organisation de coopération et de développement économique (OCDE) avait établie, sur la base de 1095 valeurs provenant de 92 études, que les individus étaient prêts à payer en moyenne 30 ÉU\$ pour réduire de 1 pour 100 000 leur risque de décès annuel associé à la pollution ambiante. La somme des CAP pour ces 100 000 personnes indique une valeur moyenne de référence de 3 millions ÉU\$2005 pour une VVS (4 millions CAD\$2018), avec un intervalle de confiance allant de 1,5 à 4,5 millions ÉU\$2005 (2 à 6 millions CAD\$2018) (Roy and Braathen, 2017).

Il n'existe pas de méthode standard pour mesurer le coût de la morbidité associée à une cause donnée. L'absence de consensus est attribuable à la pluralité des conséquences ainsi qu'à la variabilité de la gravité de ces conséquences pour une même pathologie. Les coûts de la morbidité comprennent typiquement les souffrances vécues par l'individu (*coûts de désutilité*), mais également la perte de jouissance économique liée aux revenus et au temps qui doivent être consacrés, par l'individu et son ménage, pour atténuer ou éviter les conséquences de la maladie (*coûts directs en ressources et coûts d'opportunité indirects*). Contrairement à la mortalité, qui est une conséquence claire et définitive pour l'ensemble des individus, il s'avère donc difficile de produire une estimation individuelle du CAP, à la fois exhaustive et exempte de double comptabilisation des impacts, ainsi que d'agréger de manière cohérente les CAP pour obtenir une valeur de référence. Certaines études cherchent à contourner le problème en calculant le coût de la morbidité en fonction du coût de la mortalité, à travers les concepts du nombre d'années de vie perdues (AVP), d'années de vie corrigées de la qualité (AVCQ) ou corrigées du facteur d'invalidité (AVCI), qui tiennent compte de l'âge de l'individu et des maladies préexistantes des personnes décédées. À certains égards, cette méthode conduirait à sous-estimer l'impact de la pollution atmosphérique, notamment en attribuant une valeur plus faible à la réduction du risque pour les populations plus âgées (OCDE, 2014).

Les coûts environnementaux se limitent typiquement aux émissions polluantes. Des chercheurs évaluent que les impacts sur la santé de l'essence consommée aux États-Unis est à 9 cents/litre, soit le double des coûts associés aux émissions de GES (The World Bank and IHME, 2016). En 2016, Santé Canada a publié une évaluation exhaustive des risques pour la santé humaine des gaz d'échappement des moteurs diesel et à essence. Bien que certains effets soient bien connus, dans leur ensemble, les données sur les effets indésirables des GE sur la santé (cancer et effets cardiovasculaires, immunologiques, reproductifs, développementaux et neurologiques) demeureraient encore insuffisantes (Santé Canada, 2016).

Près de 50 % des impacts sur la santé d'une infrastructure de transport se feraient sentir dans un rayon de 5 kilomètres de l'émetteur, qu'il s'agisse d'une route, d'un terminus ou d'un aéroport (The World Bank and IHME, 2016). Étant donné qu'un tiers de la population canadienne vit dans un rayon de 250 mètres d'une route principale, dont 2 millions de canadiens dans un rayon de 50 mètres, il est raisonnable de penser que la majorité de la population soit exposée de manière régulière aux gaz d'échappement des véhicules routiers.

L'effet de serre

Selon le Groupe d'expert intergouvernemental sur le climat (GIEC), les impacts du réchauffement planétaire sur les systèmes naturels et humains sont déjà visibles. Les risques futurs liés au climat dépendent du rythme, de l'intensité maximale et de la durée du réchauffement. Parmi les changements régionaux attendus, notons: une hausse des températures extrêmes dans de nombreuses régions, une augmentation de fréquence, d'intensité et/ou de quantité des fortes précipitations, une augmentation d'intensité ou de fréquence des épisodes de sécheresse, une élévation du niveau de la mer pour de nombreux systèmes humains et écologiques, et notamment l'accroissement des invasions d'eau salée, des inondations et des dégâts causés aux infrastructures, une disparition significative de l'aire de la niche climatique d'insectes, d'animaux et de plantes. Les changements climatiques entraînent par extension des risques pour la santé, les moyens de subsistance, la sécurité alimentaire, l'approvisionnement en eau, la sécurité des personnes, les infrastructures, les services publics et plus généralement la croissance économique (GIEC, 2019).

2.12.3.3 Part de responsabilité du secteur des transport dans la pollution atmosphérique

Le gouvernement fédéral recense de façon exhaustive les polluants de l'air à l'échelle nationale, provinciale et territoriale. Cette section présente les données de l'Inventaire des émissions de polluants atmosphériques (IEPA). En tant que membre du Conseil de l'Arctique, le Canada s'est engagé à produire un inventaire annuel des émissions de carbone noir (CN). L'inventaire de CN repose sur la quantité de $PM_{2,5}$ émise par combustion, multipliée par les fractions de $CN/PM_{2,5}$ propres à chaque type de source (ECCC, 2021).

Tel que présenté au Tableau 2-20, le secteur des transports est un émetteur très important de NO_x (72,8 % des émissions totales canadiennes), de CO (38,5 %), de DF (22,5 %) ainsi que de COV (17,1 %). Bien que le secteur des transports apparaisse comme un petit contributeur de PM, l'exposition chronique peut malgré tout entraîner des conséquences sur la santé humaine, considérant qu'il n'existe pas de seuil en dessous duquel aucun effet ne soit observé. Cela est particulièrement le cas dans les milieux urbains à proximité des routes principales.

Les taux d'émission de $PM_{2,5}$ par unité d'énergie sont relativement élevée dans le cas des moteurs au diesel. Les émissions de PM et de NO_x , jugées particulièrement préoccupantes pour la santé, sont principalement attribuables aux véhicules routiers lourds consommant du diésel ainsi qu'aux véhicules hors route. Le transport hors route constitue une source d'émissions très diversifiée qui comprend le matériel pour pelouses et jardins, les véhicules récréatifs comme les bateaux de plaisance et les motoneiges, le matériel agricole, les appareils de construction et d'exploitation minière, ainsi que les génératrices et pompes portatives (E. et C. climatique Canada, 2020; C. national de recherches Canada, 2020).

Les particules relativement plus grossières (TPM , PM_{10}) sont émises en grande partie par l'usure des pneus et des freins. Les particules fines ou ultrafines ($PM_{2,5}$), proviennent plutôt de la combustion. Il est estimé que près de 90 % des particules émises par des moteurs diésel sont des particules ultrafines (Santé Canada, 2016).

Les véhicules routiers à essence sont des contributeurs importants de COV et de CO et, dans une moindre mesure, de SOX, NOX, HAP et NH3.

Tableau 2-20: Émissions totales des polluants atmosphériques par source, Québec, 2018

	TPM	PM ₁₀	PM _{2,5}	SO _x	NO _x	COV	CO	NH ₃
Québec, total des émissions (Mt)	1,6	0,5	0,2	0,1	0,2	0,3	1,6	0,07
Part des transports (%)	0,6	1,8	4,0	3,1	73,8	17,1	38,5	2,4
Routiers (%)	56,3	56,8	42,3	11,4	46,7	44,7	52,1	92,1
Aérien (%)	0,6	0,6	0,6	4,7	0,7	0,5	0,9	0,0
Ferroviaire (%)	2,1	2,1	2,9	0,2	5,8	0,8	0,3	0,3
Maritime (%)	14,3	13,8	17,9	82,5	32,0	4,5	0,9	4,8
Hors route (%)	26,8	26,7	36,3	1,2	14,8	49,5	45,8	2,8
Total, modes de transport (%)	100	100	100	100	100	100	100	100
Véhicules lourds, diesel (%)	39,8	39,8	69,1	8,0	63,1	13,3	3,9	8,7
Véhicules lourds, autres (%)	2,3	2,3	3,8	9,2	7,0	6,3	16,7	3,5
Véhicules légers, essence (%)	8,7	8,7	14,6	82,1	28,9	76,3	76,5	86,7
Véhicules légers, autres (%)	0,1	0,1	0,2	0,4	0,8	2,0	1,8	0,5
Usure des pneus et des freins (%)	48,9	48,9	12,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Motocyclettes (%)	0,1	0,1	0,2	0,3	0,2	2,1	1,1	0,7
Total, transports routiers (%)	100	100	100	100	100	100	100	100
	Hg	DF	BAP	BBF	BKF	LP	HAP	
Québec, total des émissions (Kg)	664	26	13 943	20 592	7 026	8 922	50 483	
Part des transports (%)	0,8	22,5	3,1	1,3	3,4	4,0	2,6	
Routiers (%)	0,1	0,0	98,6	95,3	97,1	96,6	97,1	
Aérien (%)	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	
Ferroviaire (%)	97,4	2,2	0,1	0,5	0,4	0,1	0,3	
Maritime (%)	2,5	97,8	1,3	4,2	2,4	3,2	2,6	
Hors route (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Total, modes de transport (%)	100	100	100	100	100	100	100	
Véhicules lourds, diesel (%)	0,8	0,2	22,1	11,1	1,7	2,1	10,7	
Véhicules lourds, autres (%)	2,0	2,0	15,4	14,7	16,3	19,5	16,5	
Véhicules légers, essence (%)	96,6	97,3	61,7	73,3	81,1	77,6	71,9	
Véhicules légers, autres (%)	0,2	0,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1	
Usure des pneus et des freins (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Moto (%)	0,4	0,4	0,6	0,8	0,9	0,8	0,8	
Total, transports routiers (%)	100	100	100	100	100	100	100	

Source : Inventaire canadien des émissions de polluants atmosphériques

L'analyse des tendances, présentée à la Figure 2-70, indique une baisse graduelle des émissions polluantes au Canada. Cette baisse serait principalement attribuable aux normes règlementaires en matière d'émissions qui ont incité le développement de nouvelles technologies, mais également au renouvellement progressif de la flotte de véhicules en circulation. Les nouvelles technologies auraient cependant aussi eu pour effet de considérablement modifier les caractéristiques physiques et chimiques des émissions particulaires et gazeuses. Les conséquences de cette modification sur la santé, l'environnement et l'économie ne sont pas précisées par Santé Canada (Santé Canada, 2016). Depuis 2016, la plupart des polluants (CO, HAP, NH₃, PM, NO_x, Hg, COV) affichent cependant une légère hausse.

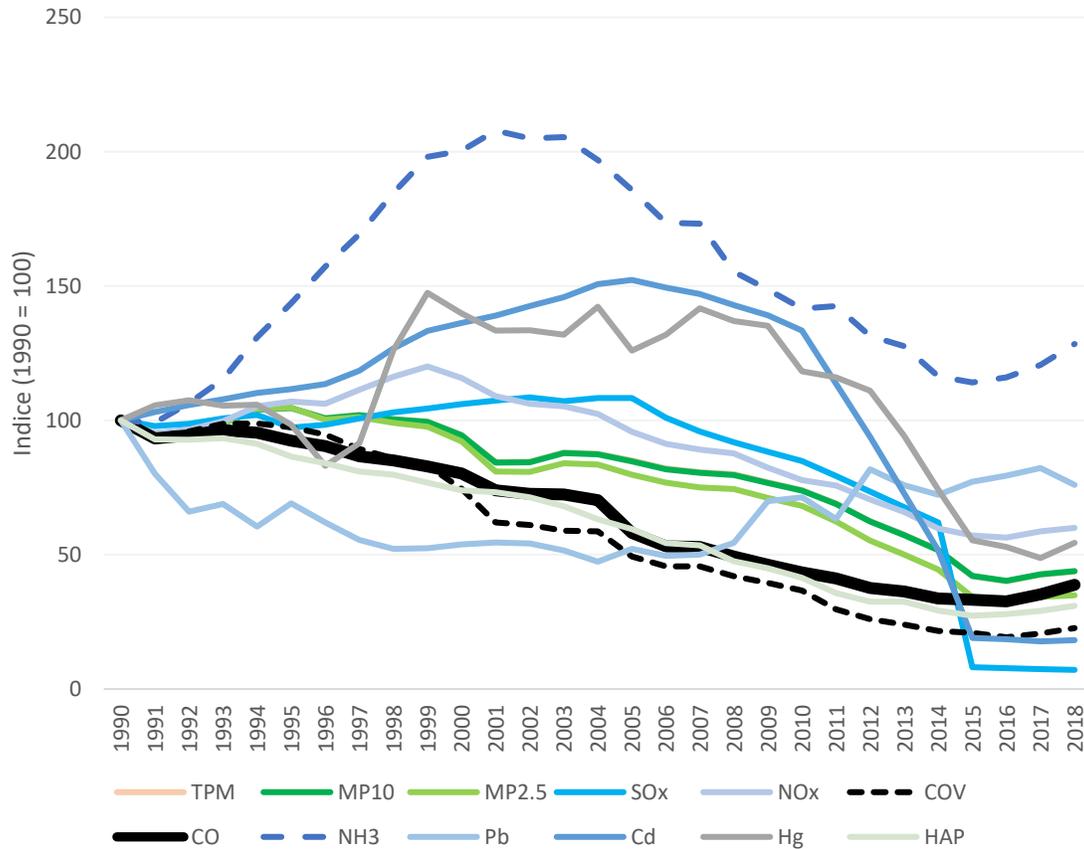


Figure 2-70: Émissions de polluants atmosphériques associées aux transports, par source, Québec, 1990-2018

Source : Inventaire canadien des émissions de polluants atmosphériques

2.12.4 Conclusion

L'état des connaissances sur les impacts de la pollution atmosphérique progresse rapidement. Autant les outils de mesures, les connaissances épidémiologiques, que les techniques de valorisation économiques connaissent chaque année des avancées scientifiques. Cette progression rapide renforce les certitudes et la volonté d'agir. La complexité des savoirs et le caractère multidisciplinaire rendent toutefois difficile le transfert de connaissances et peuvent favoriser l'immobilisme et le statu quo. Ce projet de recherche, à son terme, offrira une synthèse des enjeux, des opportunités et des améliorations qui pourraient être apportées aux guides d'évaluation de projets et autres mécanismes d'aide à la décision ainsi que de gestion de l'offre et de la demande utilisés au Québec.

3 Rayonnement

Les activités de l'année 2020 ont évidemment été lourdement touchées par la pandémie. Plusieurs activités ont été annulées ou reportées et les activités de recherche ont été ralenties par les conditions exceptionnelles et limitantes.

3.1 Publications (2020)

El-Assi, W., Morency, C., Miller, E.J., Habib, K.N. (2020). Investigating the capacity of continuous household travel surveys in capturing the temporal rhythms of travel demand, *Transportation* 47 (4), 1787-1808.

Tarpin-Pitre, L., Morency, C. (2020). Typology of Bikeshare Users Combining Bikeshare and Transit, *Transportation Research Record*, 0361198120936262.

Jeudy, Y., Morency, C. (2020). Process for the Encapsulation and Visualization of Dominant Demand and Supply Corridors, *Transportation Research Record* 2020, Vol. 2674(8) 230–242.

Garnier, C., Trépanier, M., Morency, C. (2020). Adjusting Dwell Time for Paratransit Services, *Transportation Research Record* 2020, Vol. 2674(9) 638–648.

Smargiassi, A., Plante, C., Morency P., Hatzopoulou, M., Morency, C. et al. (2020). Environmental and health impacts of transportation and land use scenarios in 2061, *Environmental Research*, 10962278.

Morency, C., Verreault, H., Frappier, A. (2020). Estimating latent cycling and walking trips in Montreal, *International journal of sustainable transportation* 14 (5), 349-360.

Morency, C., Verreault, H. (2020). Assessing the Efficiency of Household Residential Location Choices, *Transportation Research Record* 2020, Vol. 2674(11) 455–465, prix du meilleur article soumis au comité « Transportation and Land Development Committee » du Transportation Research Board.

Lavolette, J., Morency, C., Waygood, O. (2020). Persistence de l'automobilité? Analyse en trois perspectives, *Flux*, 142-172.

Morency, P., Plante, C., Dubé, A.S., Goudreau, S., Morency, C. et al. (2020). The potential impacts of urban and transit planning scenarios for 2031 on car use and active transportation in a metropolitan area, *International journal of environmental research and public health* 17 (14), 5061.

Morency, C., Bourdeau, J.-S., Verreault, H.V. (2020) Modeling the interactions between mobility options in the surrounding of bikesharing stations, in *Mapping the Travel Behavior Genome*, pp. 527-542

3.2 Principales participations à des congrès

3.2.1 Congrès annuel du Transportation research board 2020

Morency, C., Verreault, H. (2020). Assessing the Global Efficiency of Household Residential Location Choices, 99th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC.

Deschaintres, E., Morency, C., Trépanier, M. (2020). Longitudinal Modeling of the Daily Subway Ridership: Combination of Several Passive Data Streams to Investigate the Influence of Alternative Modes of Transport, 99th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC.

Mageau-Béland, J., Morency, C. (2020). Assessing Physical Activity Achievement by Using Transit, 99th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC.

Michaud, C., Morency, C., Boisjoly, G. (2020). A Framework for Assessing Public Transport Equity Through Local and Regional Accessibility, 99th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC.

Garnier, C., Trépanier, M., Morency, C. (2020). Adjusting Dwell Time for Paratransit Services, 99th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC.

Roy, F., Morency, C. (2020). Comparing Driving Cycle Development Methods Based on Markov Chains, 99th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC.

Lepage, S., Morency, C. (2020). Impact of Weather, Activities and Service Disruptions on Transportation Demand, 99th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC.

Khachman, M., Morency, C., Ciari, F. (2020). Assessing and Characterizing Spatial Interaction Between Household Types Using Spatial Multi-Nomial Logit Models, 99th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC.

Lefebvre-Ropars, G., Morency, C., Negron-Poblete, P. (2020). A Needs-Gap Analysis of Street Space Allocation, 99th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC.

3.2.2 Autres présentations

Morency, C. (2020). Mobilité: constats, tendances, transformations et pistes de solutions, congrès virtuel de l'Ordre des urbanistes du Québec, novembre 2020

Morency, C. (2020). Pour une approche holistique de la prise de décisions urbaines, présentation au Congrès annuel virtuel de l'Association québécoise des transports, Novembre 2020

4 Références

- Abraham, J. E., Stefan, K. J., & Hunt, J. D. (2012). Population synthesis using combinatorial optimization at multiple levels. 91th Annual Meeting of Transportation Research Board.
- Acheampong, R. A., Silva, E.. Land use–transport interaction modeling: A review of the literature and future research directions, 2015. *Journal of Transport and Land Use*, [S.l.], v. 8, n. 3, jul. 2015. ISSN 1938-7849.
- Anderson, M. K. (2013). *Behavioural Models for Route Choice of Passengers in Multimodal Public Transport Networks*. DTU Transport.
- Anderson, M. K., Nielsen, O. A., & Prato, C. G. (2014). Multimodal route choice models of public transport passengers in the Greater Copenhagen Area. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 6(3), 221-245. doi:10.1007/s13676-014-0063-3
- Anowar, S., Eluru, N. et Miranda-Moreno, L. F. (2014, 2014/07/04). Alternative Modeling Approaches Used for Examining Automobile Ownership: A Comprehensive Review. *Transport Reviews*, 34(4), 441-473. <https://doi.org/10.1080/01441647.2014.915440>
- Anowar, S., Eluru, N. et Miranda-Moreno, L. F. (2016, May 01). Analysis of vehicle ownership evolution in Montreal, Canada using pseudo panel analysis [journal article]. *Transportation*, 43(3), 531-548. <https://doi.org/10.1007/s11116-015-9588-z>
- Anselin, L. (1988). *Spatial Econometrics: Methods and Models*. Springer. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-94-015-7799-1>
- Arentze, T. A., & Molin, E. J. E. (2013). Travelers' preferences in multimodal networks: Design and results of a comprehensive series of choice experiments. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 58, 15-28. doi:10.1016/j.tra.2013.10.005
- Balmer, M., Rieser, M., Meister, K., Charypar, D., Lefebvre, N., Nagel, K., & Axhausen, K. (2009). MATSim-T : Architecture and Simulation Times. Dans M. Balmer, M. Rieser, K. Meister, D. Charypar, N. Lefebvre, K. Nagel, K. Axhausen, A. L. Bazzan, & F. Klügl (Éd.), *Multi-Agent Systems for Traffic and Transportation Engineering* (pp. 57-78). Information Science Reference, Hershey, Penn.
- Bar-Gera, H., Konduri, K., Sana, B., Ye, X., & Pendyala, R. M. (2009). Estimating survey weights with multiple constraints using entropy optimization methods. 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington D.C.
- Bast, H. et al. (2010). Fast Routing in Very Large Public Transportation Networks Using Transfer Patterns. *ESA 6346*, 290–301.
- Bast, H. et al. (2015). Route Planning in Transportation Networks. *arXiv.org cs.DS*, 1–65.
- Becker, H., Ciari, F., & Axhausen, K. W. (2018). Measuring the car ownership impact of free-floating car-sharing – A case study in Basel, Switzerland. *Transportation Research Part D*, 65, 51-62. doi:10.1016/j.trd.2018.08.003
- Becker, H., Loder, A., Schmid, B. et Axhausen, K. W. (2017). Modeling car-sharing membership as a mobility tool: A multivariate Probit approach with latent variables. *Travel Behaviour and Society*, 8, 26-36. <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2017.04.006>
- Beckman, J. R., Baggerly, K. A., & McKay, M. D. (1996). Creating synthetic baseline populations. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 30, 415-429.

Ben-Akiva, M., Koutsopoulos, H. N., Antoniou, C., & Balakrishna, R. (2010). Traffic Simulation with DynaMIT. Dans M. Ben-Akiva, H. N. Koutsopoulos, C. Antoniou, & R. Balakrishna, *Fundamentals of Traffic Simulation* (pp. 363-398). New York: Springer.

Bhat, C. R. et Guo, J. Y. (2007, 2007/06/01/). A comprehensive analysis of built environment characteristics on household residential choice and auto ownership levels. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41(5), 506-526. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trb.2005.12.005>

Bhat, C. R. et Pulugurta, V. (1998, 1998/01/01/). A comparison of two alternative behavioral choice mechanisms for household auto ownership decisions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 32(1), 61-75. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(97\)00014-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0191-2615(97)00014-3)

Bhat, C.R., Guo, J.Y.. A comprehensive analysis of built environment characteristics on household residential choice and auto ownership levels. 2007. *Transportation Research Part B*, 41(5), 506-526.

Bivand, R. (2019). Package 'spatialreg' : Spatial Regression Analysis. <https://cran.r-project.org/web/packages/spatialreg/spatialreg.pdf>

Bivand, R. (2020). Package 'spdep' : Spatial Dependence: Weighting Schemes, Statistics. <https://cran.r-project.org/web/packages/spdep/spdep.pdf>

Boardman, A., Greenberg, D., Vining, A., Weimer, D., 2006. *Cost-Benefit Analysis: Concepts and Practices*, Third Edition. ed. Pearson-Prentice Hall.

Boisvert, M. (2005, January). Modeling pedestrian flows in Montréal's indoor city. Dans *Associated research Centers for the Urban Underground Space, Proceedings of 10th ACUUS Conference, Moscow, Russia* (pp. 1-24).

Borysov, S.S., Rich, J., Pereira, F.C.: How to generate micro-agents? A deep generative modeling approach to population synthesis. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 106, 73–97 (2019)

Bosea, T., & Pandita, D. (2020). Heterogeneity in perception of service quality attributes of bus transit across various user categories- A case of Kolkata. *Transportation Research Procedia*. doi:10.1016/j.trpro.2020.08.239

Bourbonnais, P.-L. (2019). *Kaligrafy/trRouting* [C++]. Tiré de <https://github.com/kaligrafy/trRouting>

Bourbonnais, P.-L., Bastien, G., Faucher, J., Brosseau, Y., Morency, C. & Trépanier, M. (2021) *Transition*.

Bourbonnais, P.-L., Verreault, H., & Morency, C. (2019). Which Public Transit Routing Alternatives are Worth Calculating? A Transit Lines Filtering Algorithm to Generate Alternatives. Communication présentée à *Transportation Research Board 98th Annual Meeting*, Washington DC, United States.

Bovy, P. H. L., & Hoogendoorn-Lanser, S. (2005). Modelling route choice behaviour in multi-modal transport networks. *Transportation*, 32(4), 341-368. doi:10.1007/s11116-004-7963-2

Brundtland, G.H., 1987. *Notre avenir à tous*. Organisation des nations unies.

Buehler, R., & Hamre, A. (2015). The multimodal majority? Driving, walking, cycling, and public transportation use among American adults. *Transportation*, 42(6), 1081-1101. doi:10.1007/s11116-014-9556-z

- Campbell, K. B., & Brakewood, C. (2017). Sharing riders: How bikesharing impacts bus ridership in New York City. *Transportation Research Part A*, 100, 264-282. doi:10.1016/j.tra.2017.04.017
- Canada, C. national de recherches, 2020. La mission : diminuer les émissions de GES et de carbone noir, réduire l’empreinte environnementale et améliorer la qualité de l’air [WWW Document]. URL <https://nrc.canada.ca/fr/histoires/mission-diminuer-emissions-ges-carbone-noir-reduire-lempreinte-environnementale-ameliorer-qualite> (accessed 3.10.21).
- Canada, E. et C. climatique, 2004a. Pluies acides : causes et effets [WWW Document]. aem. URL <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/pollution-atmospherique/enjeux/pluies-acides-causes-effets.html> (accessed 3.13.21).
- Canada, E. et C. climatique, 2004b. Smog : historique de la terminologie [WWW Document]. aem. URL <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/pollution-atmospherique/enjeux/smog-causes-effets/historique-terminologie.html> (accessed 3.10.21).
- Canada, E. et C. climatique, 2015. Pollution atmosphérique transfrontalière à grande distance : protocole relatif aux polluants organiques persistants [WWW Document]. aem. URL <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/organisation/affaires-internationales/partenariats-organisations/protocole-polluants-organiques-persistants.html> (accessed 3.13.21).
- Canada, E. et C. climatique, 2018. Mesures prises pour mettre un prix sur la pollution par le carbone [WWW Document]. URL <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/fonctionnement-tarifcation-pollution/mesures-pour-mettre-un-prix-sur-carbone.html> (accessed 6.13.21).
- Canada, E. et C. climatique, 2020. Rapport d’inventaire de carbone noir du Canada 2020 [WWW Document]. aem. URL <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/pollution-atmospherique/publications/inventaire-emissions-carbone-noir-2020/chapitre-3.html#es-3> (accessed 3.10.21).
- Cao, X., Mokhtarian, P. L. et Handy, S. L. (2007, 2007/09/01). Do changes in neighborhood characteristics lead to changes in travel behavior? A structural equations modeling approach. *Transportation*, 34(5), 535-556. <https://doi.org/10.1007/s11116-007-9132-x>
- Casati, D., Müller, K., Fourrie, P. J., Erath, A., & Axhausen, K. W. (2015). Synthetic population generation by combining a hierarchical, simulation-based approach with reweighting by generalized raking. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 107-116.
- Cervero, R. et Kockelman, K. (1997). Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design. *Transportation research. Part D, Transport and environment*, 2(3), 199-219.
- Chowdhury, S., Ceder, A., & Schwalger, B. (2015). The effects of travel time and cost savings on commuters’ decision to travel on public transport routes involving transfers. *Journal of Transport Geography*, 43, 151-159. doi:10.1016/j.jtrangeo.2015.01.009
- Clark, S. (2007, 2007/05/01/). Estimating local car ownership models. *Journal of Transport Geography*, 15(3), 184-197. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2006.02.014>
- Clark, S. D. et Finley, A. O. (2009, 2010/03/01). Spatial Modelling of Car Ownership Data: A Case Study from the United Kingdom. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 3(1), 45-65. <https://doi.org/10.1007/s12061-009-9030-z>

- Clark, W.. Life course events and residential change: Unpacking age effects on the probability of moving, 2013. *Journal of Population Research*, 30(4), 319-334.
- Clifton, K., & Muhs, C. D. (2012). Capturing and Representing Multimodal Trips in Travel Surveys: Review of the Practice. *Transportation Research Record*, 2285(1), 74-83. doi:10.3141/2285-09
- Colville-Andersen, M. (2018). *Copenhagenize: the definitive guide to global bicycle urbanism*. Island Press.
- Creutzig, F., Javaid, A., Soomaroo, Z., Lohrey, S., Milojevic-Dupont, N., Ramakrishnan, A., Sethi, M., Liu, L., Niamir, L., d'Amour, C. B., Weddige, U., Lenzi, D., Kowarsch, M., Arndt, L., Baumann, L., Betzien, J., Fonkwa, L., Huber, B., Mendez, E., ... Zausch, J. M. (2020). Fair street space allocation: ethical principles and empirical insights. *Transport Reviews*, 0(0), 1-23. <https://doi.org/10.1080/01441647.2020.1762795>
- Davis, S. C. et Boundy, R. G. (2019). *Transportation Energy Data book: Edition 37.2*. https://tedb.ornl.gov/wp-content/uploads/2019/03/TEDB_37-2.pdf#page=90
- De Gruyter, C., Truong, L. T. et Taylor, E. J. (2020, 2020/01/01/). Can high quality public transport support reduced car parking requirements for new residential apartments? *Journal of Transport Geography*, 82, 102627. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2019.102627>
- dell'Olio, L., Ibeas, A., & Cecin, P. (2011). The quality of service desired by public transport users. *Transport Policy*, 18(1), 217-227. doi:10.1016/j.tranpol.2010.08.005
- Delling, D., Dibbelt, J. & Pajor, T. (2017). Faster transit routing by hyper partitioning. *drops.dagstuhl.de* doi:10.4230/oasics.atmos.2017.8.
- Delling, D., Katz, B. & Pajor, T. (2012). Parallel computation of best connections in public transportation networks. *Journal of Experimental Algorithmics* 17, 4.1-26.
- Delling, D., Pajor, T. & Werneck, R. F. (2015). Round-Based Public Transit Routing. *Transportation Science* 49, 591–604.
- Deschaintres, E., Morency, C., & Trépanier, M. (2021). Measuring Changes in Multimodal Travel Behavior Due to Transport Supply Improvement. *Transportation Research Record*.
- Diana, M. (2012). Studying Patterns of Use of Transport Modes Through Data Mining Application to US National Household Travel Survey Data Set. *Transportation Research Record*, 2308(2308), 1-9. doi:10.3141/2308-01
- Diana, M., & Mokhtarian, P. L. (2009). Desire to change one's multimodality and its relationship to the use of different transport means. *Transportation Research Part F*, 12(2), 107. doi:10.1016/j.trf.2008.09.001
- Diana, M., & Pirra, M. (2016). A comparative assessment of synthetic indices to measure multimodality behaviours. *Transportmetrica A: Transport Science*, 12(9), 771-793. doi:10.1080/23249935.2016.1177133
- Dibbelt, J., Pajor, T., Strasser, B. & Wagner, D. (2017). Connection Scan Algorithm. *arXiv.org cs.DS*.
- Dieleman, F. M., Dijst, M. et Burghouwt, G. (2002). Urban Form and Travel Behaviour: Micro-level Household Attributes and Residential Context. *Urban Studies*, 39(3), 507-527. <https://doi.org/10.1080/00420980220112801>

- Dijkstra, E. W. (1959). A Note on Two Problems in Connexion with Graphs. *Numerische Mathematik* 1, 269–271.
- Dill, J. et McNeil, N. (2016). Revisiting the Four Types of Cyclists: Findings from a National Survey. *Transportation Research Record*, 2587(1), 90-99. <https://doi.org/10.3141/2587-11>
- ECCC, 2021. Rapport d'inventaire de carbone noir du Canada 2013-2019. Environnement et Changement climatique Canada, Ottawa.
- Elhorst, J. P. (2010, 2010/03/01). Applied Spatial Econometrics: Raising the Bar. *Spatial Economic Analysis*, 5(1), 9-28. <https://doi.org/10.1080/17421770903541772>
- Eluru, N., Pinjari, A., Pendyala, R. et Bhat, C. (2010, 2010/10/01). An econometric multi-dimensional choice model of activity-travel behavior. *Transportation Letters*, 2(4), 217-230. <https://doi.org/10.3328/TL.2010.02.04.217-230>
- Environnement Canada, 2012. Évaluation scientifique canadienne du smog – Faits saillants et messages clés.
- Environnement Canada, 2019. Pollution atmosphérique [WWW Document]. URL <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/pollution-atmospherique.html> (accessed 12.11.19).
- Ettema, D., Nieuwenhuis, R.. Residential self-selection and travel behaviour: what are the effects of attitudes, reasons for location choice and the built environment ?, 2017. *Journal Transportation. Geography*. 59, 146–155.
- Fabre, L. (2018). Développement d'une typologie de ménages pour enrichir la prévision de la demande de transport.
- Fabre, L. (2018). Développement d'une typologie de ménages pour enrichir la prévision de la demande de transport [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. <https://publications.polymtl.ca/3192/>
- Fabre, L., & Morency, C. (2019). Enriching Travel Demand Forecasting Models with a Household Typology. *Transportation Research Record*, 2673(4), 975-987. doi:10.1177/0361198119838978
- Fabre, L.. Développement d'une typologie de ménages pour enrichir la prévision de la demande de transport (Masters thesis, École Polytechnique de Montréal). 2018. Retrieved from <https://publications.polymtl.ca/3192/>
- Farooq, B., Bierlaire, M., Hurtubia, R., & Flötteröd, G. (2013). Simulation based population synthesis. *Transportation Research Part B*, 243-263.
- Fournier, N., Christofa, E., Akkinpally, A.P. et al. Integrated population synthesis and workplace assignment using an efficient optimization-based person-household matching method. *Transportation* (2020). <https://doi.org/10.1007/s11116-020-10090-3>
- Frappier, A. (2015). Méthode d'évaluation de la diversité et de la qualité des alternatives de déplacement de transport en commun. (Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Montréal).
- Friedrich, M., Hofsaess, I. & Wekeck, S. (2001). Timetable-Based Transit Assignment Using Branch and Bound Techniques. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1752, 100–107.

- Garrido, S., Borysov, S., Pereira, F., Rich, J., 2019. Prediction of rare feature combinations in population synthesis: Application of deep generative modelling. Elsevier .
- Geisberger, R. (2009). Contraction of Timetable Networks with Realistic Transfers. arXiv.org cs.DS, arXiv:0908.1528.
- Geoghegan, J.. The Value of Open Spaces in Residential Land Use, 2002. *Land Use Policy* 19: 91–8.
- GIEC, 2019. Réchauffement planétaire de 1,5°C: Résumé technique à l'intention des décideurs 110.
- GIEC. (2014). 2014: Transport. Dans *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.
- Godefroy, F., Morency, C.. Estimating latent cycling trips in Montreal, 2012. *Canada Transportation Research Record. Journal of transportation research board*, 2314, pp. 120–12
- Goodwin, P. (2012). Peak Travel, Peak Car and the Future of Mobility. <https://www.oecd-ilibrary.org/content/paper/5k4c1s3l876d-en>
- Goodwin, P. et Van Dender, K. (2013, 2013/05/01). 'Peak Car' — Themes and Issues. *Transport Reviews*, 33(3), 243-254. <https://doi.org/10.1080/01441647.2013.804133>
- Google (2016). GTFS Static Overview. Google Developers (2016).
- Gössling, S., Schröder, M., Späth, P. et Freytag, T. (2016). Urban Space Distribution and Sustainable Transport. *Transport Reviews*, 36, 659-679. <https://doi.org/10.1080/01441647.2016.1147101>
- Grison, E., Burkhardt, J.-M., & Gyselinck, V. (2017). How do users choose their routes in public transport? The effect of individual profile and contextual factors. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 51, 24-37. doi:10.1016/j.trf.2017.08.011
- Guo, J. Y., & Bhat, C. R. (2007). Population synthesis for microsimulating travel behavior. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 92-101.
- Guo, Z. (2013a). Does residential parking supply affect household car ownership? The case of New York City. *Journal of Transport Geography*, 26, 18-28. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.08.006>
- Guo, Z. (2013b, 2013/01/02). Residential Street Parking and Car Ownership. *Journal of the American Planning Association*, 79(1), 32-48. <https://doi.org/10.1080/01944363.2013.790100>
- Haining, R. P. (2001). Spatial Autocorrelation. Dans N. J. Smelser et P. B. Baltes (dir.), *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences* (p. 14763-14768). Pergamon. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B0-08-043076-7/02511-0>
- Hampton, S. (2013). Measuring Oklahoma Main Streets. *Institute for Quality Communities Blog*. <http://iqc.ou.edu/2013/08/19/mainstreets/>
- Haywood, L., Koning, M. & Monchambert, G. (2017). Crowding in public transport: Who cares and why? *Transportation Research Part A* 100, 215–227.
- Heinen, E. (2018). Are multimodals more likely to change their travel behaviour? A cross-sectional analysis to explore the theoretical link between multimodality and the intention to change mode choice. *Transportation Research Part F*, 56, 200-214. doi:10.1016/j.trf.2018.04.010

- Heinen, E., & Chatterjee, K. (2015). The same mode again? An exploration of mode choice variability in Great Britain using the National Travel Survey. *Transportation Research Part A*, 78, 266-282. doi:10.1016/j.tra.2015.05.015
- Henser, D.A.. Measurement Of The Valiation Of Travel Time Savings, 2001. *Journal Of Transport Economics and Policy*, 35, Part 1, 71-98.
- Holtzclaw, J., Clear, R., Dittmar, H., Goldstein, D. et Haas, P. (2002, 2002/01/01). Location Efficiency: Neighborhood and Socio-Economic Characteristics Determine Auto Ownership and Use - Studies in Chicago, Los Angeles and San Francisco. *Transportation Planning and Technology*, 25(1), 1-27. <https://doi.org/10.1080/03081060290032033>
- Hong, S.-P., Kim, K. min, Byeon, G. & Min, Y.-H. (2017) A method to directly derive taste heterogeneity of travellers route choice in public transport from observed routes. *Transportation Research Part B* 95, 41–52.
- Hoogendoorn-Lanser, S., Nes, R. van & Bovy, P. (2005). Path Size Modeling in Multimodal Route Choice Analysis. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1921, 27–34.
- Hui, N., Saxe, S., Roorda, M., Hess, P. et Miller, E. J. (2018). Measuring the completeness of complete streets. *Transport Reviews*, 38, 73-95. <https://dx.doi.org/10.1080/01441647.2017.1299815>
- Hunt J.D.. Stated Preference Examination of Factors Influencing Residential Attraction, 2010. In: Pagliara F., Preston J., Simmonds D. (eds) *Residential Location Choice. Advances in Spatial Science (The Regional Science Series)*. Springer, Berlin, Heidelberg
- Ibeasa, A., Corderac, R., Olíoa, L., Coppolab, P.. Modelling the spatial interactions between workplace and residential location, 2013. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, ISSN: 0965-8564, Vol: 49, Page: 110-122
- Imani, A. F., Miller, E. J. et Saxe, S. (2018). Cycle Accessibility and Level of Traffic Stress: A Case Study of Toronto. *Transportation Research Board 97th Annual Meeting* Transportation Research Board. <https://trid.trb.org/view/1496662>
- indrz.com, G. O. M. O. G. I. platform. (n.d.). Retrieved from <https://campusplan.aau.at/en/>
- INSPQ, 2018. Les impacts sanitaires de la pollution de l'air au Canada : une estimation des décès prématurés. *Bull. Inf. En Santé Environnementale*.
- Jánošíková, L., Slavík, J. & Koháni, M. (2014). Estimation of a route choice model for urban public transport using smart card data. *Transportation Planning and Technology* 37, 638–648.
- Jiao, J. (2017). Identifying transit deserts in major Texas cities where the supplies missed the demands. *Journal of Transport and Land Use*, 10(1), 529-540. doi:10.5198/jtlu.2017.899
- Johnsen, M.M., Brandt, O., Garrido, S., & Pereira, F. (2020). Population synthesis for urban resident modeling using deep generative models. *ArXiv*, abs/2011.06851.
- Jones, P., Marshall, S. et Boujenko, N. (2008). Creating more people-friendly urban streets through « Link and Place » street planning and design. *IATSS Research*, 32, 14-25. [https://dx.doi.org/10.1016/S0386-1112\(14\)60196-5](https://dx.doi.org/10.1016/S0386-1112(14)60196-5)

- Jones, P., Marshall, S. et Boujenko, N. (2009). « Link » and « Place »: A New Approach to Street Planning and Design. *Road and Transport Research: A Journal of Australian and New Zealand Research and Practice*, 18.
- Kagerbauer, M., Hilgert, T., Schroeder, O., & Vortisch, P. (2015). Household Travel Survey of Intermodal Trips – Approach, Challenges and Comparison. *Transportation Research Procedia*, 11(C), 330-339. doi:10.1016/j.trpro.2015.12.028
- Kelejian, H. H. et Prucha, I. R. (2010, 2010/07/01/). Specification and estimation of spatial autoregressive models with autoregressive and heteroskedastic disturbances. *Journal of Econometrics*, 157(1), 53-67. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2009.10.025>
- Kim, H. S. et Kim, E. (2004). EFFECTS OF PUBLIC TRANSIT ON AUTOMOBILE OWNERSHIP AND USE IN HOUSEHOLDS OF THE USA. *Review of Urban & Regional Development Studies*, 16(3), 245-262. <https://doi.org/10.1111/j.1467-940X.2005.00090.x>
- Kim, H.-Y. (2013). Statistical notes for clinical researchers: assessing normal distribution (2) using skewness and kurtosis. *Restorative dentistry & endodontics*, 38(1), 52-54. <https://doi.org/10.5395/rde.2013.38.1.52>
- Kim, I., Kim, H. C., Seo, D. J., & Kim, J. I. (2020). Calibration of a transit route choice model using revealed population data of smartcard in a multimodal transit network. *Transportation*, 47(5), 2179-2202. doi:10.1007/s11116-019-10008-8
- Kockelman, K.M., Nurul Habib, K.M.. Modeling the Choice of Residential Location and Home Type : Recent Movers in Austin, Texas', 2008. Presented at the 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board, to be held in Washington, D.C., January 13-17, 2008
- Konduri, K. C., You, D., Garikapati, V. M., & Pendyala, R. (2016). Enhanced synthetic population generator that accomodates control variables at multiple geographic resolutions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 40-50.
- Kuhnimhof, T., Buehler, R., & Dargay, J. (2011). A New Generation: Travel Trends for Young Germans and Britons. *Transportation Research Record*, 2230(1), 58-67. doi:10.3141/2230-07
- Kuhnimhof, T., Chlond, B., & Huang, P.-C. (2010). Multimodal Travel Choices of Bicyclists: Multiday Data Analysis of Bicycle Use in Germany. *Transportation Research Record*, 2190(1), 19-27. doi:10.3141/2190-03
- Kuhnimhof, T., Chlond, B., & Von Der Ruhren, S. (2006). Users of transport modes and multimodal travel behavior: Steps toward understanding travelers' options and choices. *Transportation Research Record*, 1985(1), 40-48.
- Lapinski, M. K. et Rimal, R. N. (2005). An Explication of Social Norms. *Communication Theory*, 15(2), 127-147. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2885.2005.tb00329.x>
- Lavolette, J., Morency, C. et Waygood, E. O. D. (2020). Persistance de l'automobilité ? Analyse en trois perspectives. *Flux*, 119-120(1), 142-172. <https://doi.org/10.3917/flux1.119.0142>
- Lavolette, J., Morency, C., Waygood, E. O. D. et Goulias, K. G. (2021, 2021-02-27). Car Ownership and the Built Environment: A Spatial Modeling Approach. 2021 Transportation Research Board Annual Meeting, Virtual Conference.
- Lee, B.H.Y., Waddell, P. (2010) *Transportation* Volume 37, Issue 4, pp 587–601. <https://doi.org/10.1007/s11116-010-9270-4>

- Lepage, S., & Morency, C. (2020). Impact of Weather, Activities, and Service Disruptions on Transportation Demand. *Transportation Research Record*, 0(0). doi:10.1177/0361198120966326
- LeSage, J. P. (2008, 44). An Introduction to Spatial Econometrics. *Revue d'économie industrielle*, 123(4). <https://doi.org/10.4000/rei.3887>
- LeSage, J. P. (2014). What Regional Scientists Need to Know About Spatial Econometrics. SSRN. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2420725>
- LeSage, J. P. et Pace, R. K. (2009). *Introduction to Spatial Econometrics*. Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781420064254>
- LeSage, J. P. et Pace, R. K. (2014). The biggest myth in spatial econometrics. *Econometrics*, 2(4), 217-249.
- Lin, T., Wang, D., Guan, X.. The built environment, travel attitude, and travel behavior: Residential self-selection or residential determination ?, 2017. *Journal of Transport Geography*, 65, 111-122
- Litman, T. (2008). Valuing Transit Service Quality Improvements. *Journal of Public Transportation*, 11(2).
- Løvås, G. G. (1994). Modeling and simulation of pedestrian traffic flow. *Transportation Research Part B: Methodological*, 28(6), 429-443.
- Luxen, D. & Vetter, C. (2011) Real-time routing with OpenStreetMap data. in undefined 513--516. doi:10.1145/2093973.2094062.
- Luxen, D., & Vetter, C. (2011). Real-time routing with OpenStreetMap data. Communication présentée à 19th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems, Chicago, Illinois. Tiré de <https://doi.org/10.1145/2093973.2094062>
- Maire, P. (2011). *Étude multidisciplinaire d'un développement durable du sous-sol urbain* (No. THESIS). EPFL.
- Manaugh, K, El-Geneidy, A.. The importance of neighborhood type dissonance in understanding the effect of the built environment on travel behavior, 2015. *Journal of Transport and Land Use*, [S.l.], v. 8, n. 2, may. 2015. ISSN 1938-7849.
- Martel-Poliquin, É. (2012). Mieux comprendre les déterminants du choix modal. (École Polytechnique de Montréal).
- Martens, K. et Di Ciommo, F. (2017). Travel time savings, accessibility gains and equity effects in cost–benefit analysis. *Transport Reviews*, 37(2), 152-169. <https://doi.org/10.1080/01441647.2016.1276642>
- McFadden, D. Modeling the choice of residential location, In *Spatial Interaction Theory and Planning Models*, 1978, edited by A. Karlqvist et al. Amsterdam: North Holland Publishers
- MELCC, 2018. Le système québécois de plafonnement et d'échange de droits d'émission: en bref [WWW Document]. URL <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/carbone/documents-spede/en-bref.pdf> (accessed 6.13.21).
- MELCC, 2020. Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2018 et leur évolution depuis 1990 48.

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

Moeckel, R.. Constraints in household relocation: Modeling land-use/transport interactions that respect time and monetary budgets. *Journal of Transport and Land Use*, 2016 [S.I.], v. 10, n. 1, jan. 2016. ISSN 1938-7849. doi:<http://dx.doi.org/10.5198/jtlu.2015.810>.

Mohammadian, A., Javanmardi, M., & Zhang, Y. (2010). Synthetic household travel survey data simulation. *Transportation Research Part C*, 18(6), 869-878.

Molin, E., Mokhtarian, P., & Kroesen, M. (2016). Multimodal travel groups and attitudes: A latent class cluster analysis of Dutch travelers. *Transportation Research Part A*, 83, 14-29. doi:10.1016/j.tra.2015.11.001

Morency, C., Bourdeau, J.-S., & Verreault, H. (2020). Modeling the interactions between mobility options in the surrounding of bikesharing stations. Dans *Mapping the Travel Behavior Genome* (p. 527-542): Elsevier.

Morency, C., Demers, M., Lapierre, L.. How Many Steps Do You Have in Reserve? Thoughts and Measures About a Healthier Way to Travel, 2007. *Transportation Research Record*, 2002, p. 1-6.

Morency, C., Demers, M., Poliquin, E.. Shifting short motorized trips to walking: The potential of active transportation for physical activity in Montreal, 2014. *Journal of Transport & Health*, Volume 1, Issue 2, June 2014, Pages 100–107

Morency, C., Roorda, M.-J., Demers, M.. Steps in Reserve: Comparing Latent Walk 445 Trips in Toronto and Montreal, 2009. Paper presented at the 88th Annual Meeting of the 446 Transportation Research Board, Washington DC, <http://dx.doi.org/10.3141/2140-12>

Morency, C., Trépanier, M., Saunier, N., Verreault, H., & Bourdeau, J.-S. (2018). Using 5 parallel passive data streams to report on a wide range of mobility options. *Transportation Research Procedia*, 32, 82-92.

Morency, C., Verreault, H. et Bourdeau, J.-S. (2016). Analyse tendancielle à Montréal – possession du permis de conduire, accès et utilisation de l'automobile. F. V. Mobiles. <http://fr.forumviesmobiles.org/projet/2016/09/20/evolmob-evolution-rapport-des-jeunes-voiture-2424>

Morency, C., Verreault, H. et Frappier, A. (2019). Estimating latent cycling and walking trips in Montreal. *International Journal of Sustainable Transportation*, 0(0), 1-12. <https://doi.org/10.1080/15568318.2018.1558467>

Morency, C., Verreault, H. et Frappier, A. (2019). Estimating latent cycling and walking trips in Montreal. *International Journal of Sustainable Transportation*, 1-12. <https://doi.org/10.1080/15568318.2018.1558467>

Morency, C., Verreault, H., Bourdeau, J.-S., Frappier, A., Faucher, J. et Bahbouh, K. (2015). Assistance méthodologique pour le traitement et l'analyse des données des enquêtes Origine-Destination québécoises pour dresser le portrait du Vélo au Québec en 2015 (p. 179). Polytechnique Montréal. <https://www.velo.qc.ca/wp-content/uploads/2020/01/vq-edv2015-analyseenqueteod.pdf>

Morency, C., Verreault, H., Frappier, A.. Estimating latent cycling and walking trips in Montreal, 2019. *International Journal of Sustainable Transportation*, DOI: 10.1080/15568318.2018.1558467

- Moreno, A. T., & Moeckel, R. (2018). Population Synthesis Handling Three Geographical Resolutions. *International Journal of Geo-Information*.
- Müller, K., & Axhausen, K. W. (2011). Hierarchical IPF : Generating a synthetic population for Switzerland. 51st Congress of the European Regional Science Association. Barcelona.
- Müller, K., & Axhausen, K. W. (2012). Multi-level fitting algorithms for population synthesis [Working Paper]. Zurich: Institute for Transport Planning and Systems (IVT), ETH Zurich.
- Müller-Hannemann, M., Schulz, F., Wagner, D. & Zaroliagis, C. (2007). Timetable Information: Models and Algorithms. in undefined vol. 4359 67–90.
- NACTO. (2013). Urban street design guide. Island Press. <https://nacto.org/publication/urban-street-design-guide/>
- Nazem, M., Trépanier, M. & Morency, C. (2018). Demographic Analysis of Route Choice for Public Transit. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2217, 71–78.
- Nello-Deakin, S. (2019). Is there such a thing as a 'fair' distribution of road space? *Journal of Urban Design*, 24(5), 698-714. <https://doi.org/10.1080/13574809.2019.1592664>
- Nicholson, W., Snyder, C., 2008. *Microeconomic Theory: Basic Principles and Extension*, 10th ed. South-Western, Mason.
- Nobis, C. (2007). Multimodality: facets and causes of sustainable mobility behavior. *Transportation Research Record*, 2010(1), 35-44.
- Nurlaela, S., Curtis, C.. Modeling household residential location choice and travel behavior and its relationship with public transport accessibility (2012). *Procedia Soc. Behav. Sci.* 2012, 54, 56–64.
- Observatoire Grand Montréal. (2018). Déplacements domicile-travail dans le Grand Montréal: Faible progression du transport durable depuis 2001 (no 35) (p. 8). Communauté métropolitaine de Montréal. <https://cmm.qc.ca/documentation/perspective-grand-montreal/perspective-grand-montreal-no35/>
- OCDE, 2014. Le coût de la pollution de l'air: Impacts sanitaires du transport routier.
- OECD, 2018. Cost-Benefit Analysis and the Environment: Further Developments and Policy Use. OECD. <https://doi.org/10.1787/9789264085169-en>
- Oostendorp, R., & Gebhardt, L. (2018). Combining means of transport as a users' strategy to optimize traveling in an urban context: empirical results on intermodal travel behavior from a survey in Berlin. *Journal of Transport Geography*, 71, 72-83. doi:10.1016/j.jtrangeo.2018.07.006
- Openshaw, S., & Rao, L. (1995). Algorithms for Reengineering 1991 Census Geography. *Environment and Planning A : Economy and Space*.
- OpenStreetMap (2015) *File:Side stairs.png*. Retrieved from https://wiki.openstreetmap.org/wiki/File:Side_stairs.png
- OpenStreetMap. (2019, 18 juillet). Map Features — Highway [wiki]. OpenStreetMap Wiki. https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Map_Features#Highway
- Paleti, R., Bhat, C. R., Pendyala, R. M. et Goulias, K. G. (2013). Modeling of Household Vehicle Type Choice Accommodating Spatial Dependence Effects. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2343(1), 86-94. <https://doi.org/10.3141/2343-11>

- Patton, J. W. (2007). A Pedestrian World: Competing Rationalities and the Calculation of Transportation Change. *Environment and Planning A*, 39, 928-944. <https://doi.org/10.1068/a389>
- Piras, G. (2010). sphet: Spatial models with heteroskedastic innovations in R. *Journal of Statistical Software*, 35(1), 1-21. <https://cran.r-project.org/web/packages/sphet/vignettes/sphet.pdf>
- Potoglou, D. et Kanaroglou, P. S. (2008). Modelling car ownership in urban areas: a case study of Hamilton, Canada. *Journal of Transport Geography*, 16(1), 42-54. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2007.01.006>
- Prasad, T., Sathyanarayanan, K., Tiwari, S., Goveas, N. & Deshpande, B. (2016). t-CSA: A fast and flexible CSA implementation. in undefined 1–6. doi:10.1109/comsnets.2016.7439937.
- Rabe, B., Taylor, M.. Residential mobility, quality of neighborhood and life course events, 2010. *Journal of the Royal Statistical Society A*, 173, 531–555.
- RAJI, B. A. (2014). *SPATIO-TEMPORAL ANALYSIS OF PEDESTRIAN TRAFFIC IN IKEJA AREA, LAGOS* (Doctoral dissertation).
- Raveau, S. n, Guo, Z., Muñoz, J. C. & Wilson, N. H. M. (2014). A behavioural comparison of route choice on metro networks: Time, transfers, crowding, topology and socio-demographics. *Transportation Research Part A* 66, 185–195.
- Raveau, S., Guo, Z., Munoz, J. C., & Wilson, N. H. M. (2014). A behavioural comparison of route choice on metro networks: Time, transfers, crowding, topology and socio-demographics. *Transportation Research Part a-Policy and Practice*, 66, 185-195. doi:10.1016/j.tra.2014.05.010
- Raveau, S., Muñoz, J. C., & Grange, L. d. (2011). A topological route choice model for metro. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 45(2), 138-147. doi:10.1016/j.tra.2010.12.004
- Rodriguez-Valencia, A. (2014). The Urban Right-of-way Allocation Problem: Considering All Demands. *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*, Washington, DC, United States (p. 18). <https://trid.trb.org/view/1288973>
- Roy, R., Braathen, N.A., 2017. The Rising Cost of Ambient Air Pollution thus far in the 21st Century: Results from the BRIICS and the OECD Countries (No. 124), OECD Environment Working Papers. OECD.
- Saadi, I., Mustafa, A., Teller, J., Farooq, B., Cools, M., 2016. Hidden Markov model-based population synthesis. *Transport. Res. Part B: Methodol.* 90, 1–21. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261515300904>>
- Salvini, P. A., & Miller, E. J. (2005). An Operational Prototype of a Comprehensive Microsimulation Model of Urban Systems. *Networks and Spatial Economics*, 217-234.
- Santé Canada, 2016. Évaluation des risques pour la santé humaine des gaz d'échappement des moteurs diesel.
- Sayyadi, G., & Awasthi, A. (2013). AHP-based approach for location planning of pedestrian zones: Application in Montréal, Canada. *Journal of transportation engineering*, 139(2), 239-246.
- Scheiner, J., Chatterjee, K., & Heinen, E. (2016). Key events and multimodality: A life course approach. *Transportation Research Part A*, 91, 148-165. doi:10.1016/j.tra.2016.06.028

- Senbil, M., Kitamura, R. et Mohamad, J. (2009, 2009/05/01). Residential location, vehicle ownership and travel in Asia: a comparative analysis of Kei-Han-Shin and Kuala Lumpur metropolitan areas. *Transportation*, 36(3), 325-350. <https://doi.org/10.1007/s11116-009-9195-y>
- Sinniah, G. K., Shah, M. Z., Vigar, G., Aditjandra, P. T.. Residential location preferences: New perspective. *Transportation Research Procedia*, 2016, 17,369–383.<http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2016.11.128>
- Sioui, L., Morency, C. et Trépanier, M. (2013, 2013/01/01). How Carsharing Affects the Travel Behavior of Households: A Case Study of Montréal, Canada. *International Journal of Sustainable Transportation*, 7(1), 52-69. <https://doi.org/10.1080/15568318.2012.660109>
- Statistic Canada. (2017). Montréal, TÉ [Census division], Quebec and Quebec [Province] (table). Census Profile. <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2016/dp-pd/prof/index.cfm?Lang=E>
- Steg, L. (2005). Car use: lust and must. Instrumental, symbolic and affective motives for car use. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 39(2-3), 147-162. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2004.07.001>
- Stiglitz, J., Walsh, C., Lafay, J.-D., 2007. *Principes d'économie moderne*, 3e édition. ed. De Boeck, Bruxelles.
- Strasser, B. & Wagner, D. (2013). *Connection Scan Accelerated*. (Society for Industrial and Applied Mathematics, 2013). doi:10.1137/1.9781611973198.12.
- Stuart, E. A., Huskamp, H. A., Duckworth, K., Simmons, J., Song, Z., Chernew, M., & Barry, C. L. (2014). Using propensity scores in difference-in-differences models to estimate the effects of a policy change. *Health services & outcomes research methodology*, 14(4), 166-182. doi:10.1007/s10742-014-0123-z
- Sun, L., & Erath, A. (2015). A Bayesian network approach for population synthesis. *Transportation Research Part C*, 49-62.
- Sun, L., Erath, A., Cai, M.: A hierarchical mixture modeling framework for population synthesis. *Transp. Res. Part B Methodol.* 114, 199–212 (2018)
- Sun, Y.-I., Susilo, Y. O., Waygood, E. O. D. et Wang, D.-h. (2014, July 01). Detangling the impacts of age, residential locations and household lifecycle in car usage and ownership in the Osaka metropolitan area, Japan [journal article]. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 15(7), 517-528. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1300345>
- Sun, Y.-I., Waygood, E. O. D. et Huang, Z. (2012, 2012/01/01). Do Automobility Cohorts Exist in Urban Travel?: Case Study of Osaka Metropolitan Area, Japan. *Transportation Research Record*, 2323(1), 18-24. <https://doi.org/10.3141/2323-03>
- The City of Stockholm Traffic Administration. (2012). *Urban Mobility Strategy* (p. 72). City of Stockholm. <https://international.stockholm.se/globalassets/ovriga-bilder-och-filer/urban-mobility-strategy.pdf>
- The Lancet, 2017. Global, regional, and national comparative risk assessment of 84 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks for 195 countries and territories, 1990–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017.

The World Bank, IHME, 2016. The Cost of IA_r Pollution: Stengthening the Economic Case for Action. Seattle.

The World Bank. (2014). Transport for Health: The Global Burden of Disease from Motorized Road Transport.

http://siteresources.worldbank.org/INTTOPGLOROASAF/Resources/IHME_T4H_FINAL_TO_WORLD_BANK-compressed.pdf

Tirachini, A., Hensher, D. A. & Rose, J. M. (2013). Crowding in public transport systems: Effects on users, operation and implications for the estimation of demand. *Transportation Research Part A* 53, 36–52.

Trépanier, M., Tranchant, N. & Chapleau, R. (2007). Individual Trip Destination Estimation in a Transit Smart Card Automated Fare Collection System. *Journal of Intelligent Transportation Systems* 11, 1–14.

Van Acker, V., Mokhtarian, P. L. et Witlox, F. (2014, 2014/09/01/). Car availability explained by the structural relationships between lifestyles, residential location, and underlying residential and travel attitudes. *Transport Policy*, 35, 88-99. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.05.006>

van Wee, B., & Geurs, K. (2011). Discussing Equity and Social Exclusion in Accessibility Evaluations. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 11(4), 350-367. Tiré de <Go to ISI>://WOS:000295120200002

van Wee, B., van Cranenburgh, S., & Maat, K. (2019). Substitutability as a spatial concept to evaluate travel alternatives. *Journal of Transport Geography*, 79. doi:10.1016/j.jtrangeo.2019.102469

Vélo Québec. (2016). Cycling in Québec in 2015 (p. 15). Vélo Québec. velo.qc.ca/cycling2015

Vij, A., Carrel, A., & Walker, J. L. (2011). Capturing modality styles using behavioral mixture models and longitudinal data. Communication présentée à 2nd international choice modelling conference, Leeds.

Ville de Montréal. (2017a). Aménagements piétons universellement accessibles. Dans *Guide d'aménagement durable des rues de Montréal* (vol. 5, p. 230). Ville de Montréal. http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/TRANSPORTS_FR/MEDIA/DOCUMENTS/FASCICULE_5_AMENAGEMENT_PIETON.PDF

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

Voas, D., & Williamson, P. (2000). An evaluation of the combinatorial optimisation approach to the creation of synthetic microdata. *International Journal of Population Geography*.

Waddell, P. (2002). UrbanSim: Modeling Urban Development for Land Use, Transportation, and Environmental Planning. *Journal of the American Planning Association*, 297-314.

Waddell, P.. *Accessibility and Residential Location: the Interaction of Workplace, Housing Tenure, Residential Mobility and Location Choice*, 2007. book: *Modelling Residential Location Choice* Publisher: Ashgate

- Wardman, M., Chintakayala, V. P. K. & Jong, G. de (2016). Values of travel time in Europe: Review and meta-analysis. *Transportation Research Part A* 94, 93–111.
- Wheeler, D. C., & Pàez, A. (2010). Geographically Weighted Regression. Dans *Handbook of Applied Spatial Analysis, Software Tools, Methods and Applications*. 461-486: Springer.
- Whelan, G., Crockett, J. et Vitouladiti, S. (2010). A New Model of Car Ownership in London: Geo-Spatial Analysis of Policy Interventions.
- Wilkens, R., Warren, D., Hahn, M., Houg, B.. Families, incomes and jobs, vol. 5: A statistical report on waves 1–7 of the household, income and labour dynamics in Australia Survey, 2010. Melbourne: University of Melbourne, Melbourne Institute of Applied Economic and Social Research.
- Williamson, P., Birkin, M., & Rees, P. H. (1998). The estimation of population microdata by using data from small area statistics and samples of anonymised records. *Environment and Planning Part A*, 785-816.
- Witt, S. (2015). Trip-Based Public Transit Routing. arXiv.org cs.DS, arXiv:1504.07149-1036.
- Xiao, J., Su, R., McBride, E., & Goulias, K. (2020). Exploring the correlations between spatiotemporal daily activity-travel patterns and stated interest and perception of risk with self-driving cars. *AGILE: GIScience Series*, 1, 1-15. doi:10.5194/agile-giss-1-22-2020
- Yang, X., Chen, A., Ning, B., & Tang, T. (2017). Measuring Route Diversity for Urban Rail Transit Networks: A Case Study of the Beijing Metro Network. *Ieee Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(2), 259-268. doi:10.1109/Tits.2016.2566801
- Ye, C., Konduri, K., Pendyala, R. M., Sana, B., & Waddell, P. (2009). A methodology to match distributions of both household and person attributes in the generation of synthetic populations. *Transportation Research Board*.
- Zhou, X., Jia, X., & Du, H. (2015). Travel Mode Choice Based on Perceived Quality of Bus Service.
- Zhuge, C., Li, X., Ku, C.-A., Gao, J., & Zhang, H. (2017). A Heuristic-Based Population Synthesis Method for Micro-Simulation in Transportation. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2373-2383.
- Zondag, B., Pieters, M.. Influence of Accessibility on Residential Location Choice, 2005. *Transportation Research Record*, 1902(1), 63–70. <https://doi.org/10.1177/0361198105190200108>